



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Projekt Hochtemperaturreaktor mit Heliumturbine

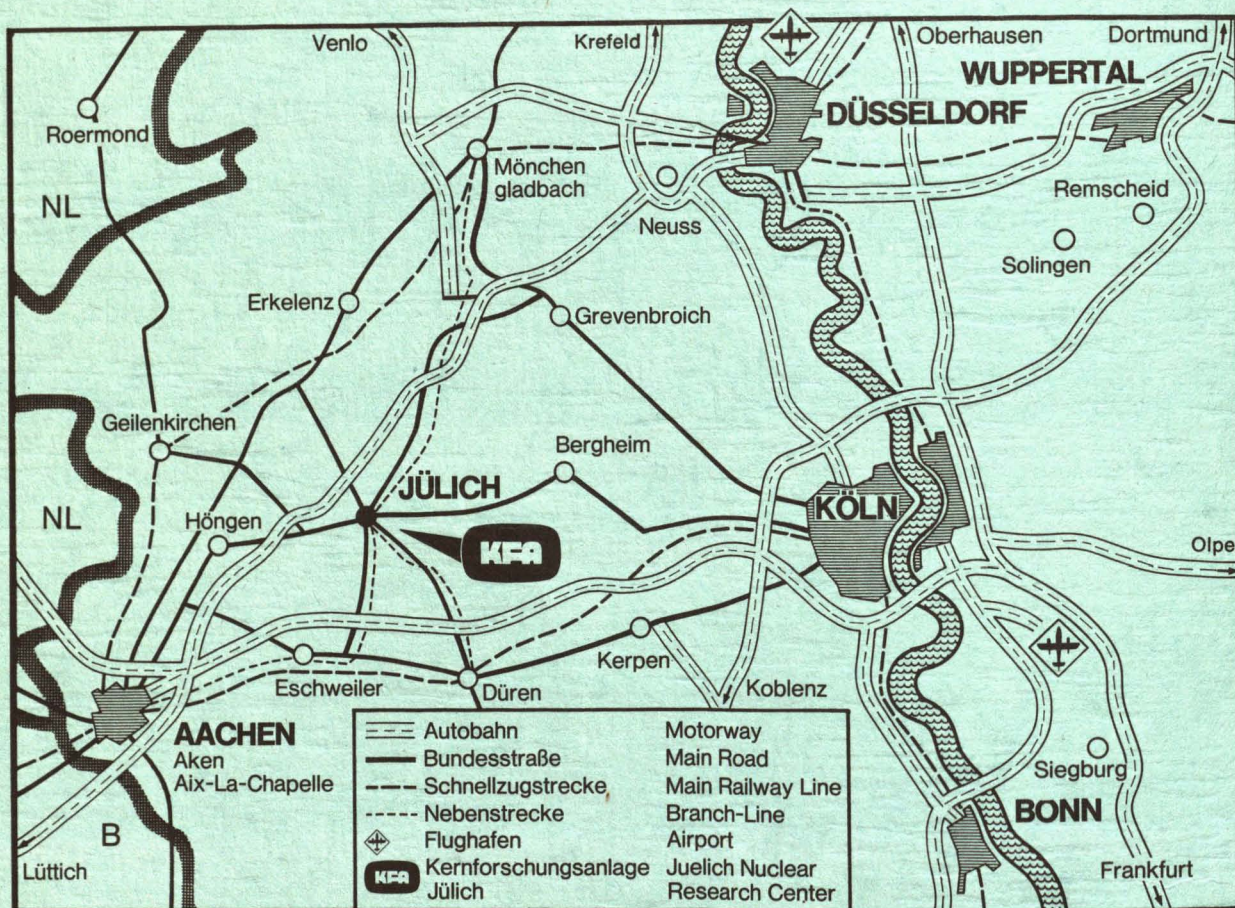
Untersuchungen an einer Faserisolierung im Druckentlastungsversuchsstand

von

J. Henssen, H. Lang, G. Lonzen und H.-J. Weise

**Jül - 1405
März 1977**

Als Manuskript gedruckt
ISSN 0366-0885



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 1405

Projekt Hochtemperaturreaktor mit Heliumturbine Jül – 1405

Im Tausch zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

Untersuchungen an einer Faserisolierung im Druckentlastungsversuchsstand

von

J. Henssen¹⁾, H. Lang²⁾, G. Lonzen¹⁾ und H.-J. Weise²⁾

¹⁾ Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH

²⁾ Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Die Arbeit ist im Rahmen des Zusammenarbeitsvertrages zwischen den Firmen

BBC Aktiengesellschaft Brown Boveri & Cie, Baden
Brown Boveri & Cie AG, Mannheim
Eidg. Institut für Reaktorforschung, Würenlingen
Gebrüder Sulzer AG, Winterthur
Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, Köln
Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Jülich
Nuclear-Chemie und Metallurgie GmbH, Wolfgang
Schweizerische Aluminium AG, Zürich

im Rahmen des von der Bundesrepublik Deutschland, dem Land Nordrhein-Westfalen und der Schweizerischen Eidgenossenschaft geförderten Entwicklungsprogramms

"Kernkraftwerk mit Hochtemperaturreaktor und Heliumturbine großer Leistung (HHT)"

entstanden.

Die Autoren möchten sich an dieser Stelle bei den beteiligten Mitarbeitern der ARGAS-Gruppe der KFA und der Jülicher Versuchsabteilung von HRB bedanken.

Diese Arbeit erscheint gleichzeitig als Bericht Nr. BE 0063 der Firma Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH in Jülich.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Aufgabenstellung	1
3. Versuchsaufbau	
3.1 Versuchsanlage	2
3.2 Druckrohr	3
3.3 Kühlwasserfließschema	3
3.4 Isolierung	3
3.5 Meßbestückung	4
4. Versuchsdurchführung	
4.1 Thermische Untersuchungen bei evakuierter Teststrecke	5
4.2 Thermische Untersuchungen in Helium	5
4.3 Druckentlastungsversuche	6
5. Versuchsauswertung	6
6. Versuchsergebnisse	
6.1 Temperaturprofile am Innenliner	6
6.2 Kühlwasser- und Wandtemperaturen am Testrohr	7
6.3 Temperaturprofile in der Isolierung	7
6.4 Wärmestromdichte	9
6.5 Wärmeleitfähigkeit und Nusselt-Zahlen	10
6.6 Druckentlastungsversuche	11
7. Zusammenfassung	13
8. Literaturverzeichnis	15
9. Verzeichnis der Abbildungen	16

1. Einleitung

Dieser Bericht ist im Rahmen der von der öffentlichen Hand in der Bundesrepublik Deutschland und der Schweiz geförderten Entwicklung von Kernkraftwerken mit Hochtemperaturreaktor und Heliumturbine großer Leistung (HHT-Projekt) entstanden. Die Versuche, über die berichtet wird, wurden in Zusammenarbeit zwischen der Jülicher Versuchsabteilung der Firma Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH (HRB) und der Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA) am Druckentlastungsversuchsstand der KFA durchgeführt.

Die Themenstellung für die Versuchsvorhaben war durch die Randbedingungen des HHT-Projektes bestimmt. Im Rahmen des Gesamtprojektes stellt die Heißgasführung zwischen Reaktorcore und Turbineneintritt einen Entwicklungsschwerpunkt bei der Verwirklichung der Zielsetzung des HHT-Projektes dar. Entsprechend intensiv waren und sind die Bemühungen, für die Heißgasführung eine Optimalkonstruktion zu verwirklichen. Die Heißgasführung hat seit dem Beginn der Untersuchungen einmal vom HHT-Anlagenkonzept und zum anderen auch durch verschiedene Untersuchungsergebnisse eine Reihe von Modifikationen erfahren. Die bei den Versuchen verwendete Isolierung in gestopfter Faserausführung stellt insofern ein Testobjekt von besonderem Interesse dar, als eine Isolierung der untersuchten Bauart in der Heißgasleitung der Hochtemperatur-Helium-Versuchsanlage (HHV) zum Einsatz kommt.

2. Aufgabenstellung

Rohrleitungen für Hochtemperaturreaktoren mit Heliumturbine (HHT-Anlagen) werden zur Zeit für Gastemperaturen von 850°C und Drücke von 50 - 60 bar projektiert. Die bisher betriebenen gasgekühlten Reaktoren benötigten überwiegend horizontale oder vertikale Isolationen zum Schutz der Spannbetonbehälter. Für Heißgasleitungen, die den zu erwartenden Anforderungen genügen, liegen die theoretischen Voraussetzungen für ihre Auslegung nicht vor.

Im Rahmen des mit den Partnern des HHT-Projektes abgestimmten Versuchsprogramms war deshalb beschlossen worden, unabhängig voneinander zwei industriell gefertigte Isolationstypen im Hochdruckgaskanal des Institutes für Reaktorbauelemente sowie in der ARGAS-Anlage und dem Druckentlastungsprüfstand experimentell zu untersuchen.

Es handelte sich hierbei um eine Metallfolienisolierung der Firma Darchem und um eine Faserisolierung der Firma BBC. Sowohl die Versuche unter strömendem Helium in der ARGAS-Anlage wie auch die stationären thermischen Untersuchungen und die Druckentlastungsversuche im Druckentlastungsprüfstand sind für die Folienisolierung abgeschlossen (s. Jül-Rep. 1318). Über die Versuche im HD-Kanal liegen Berichte bereits vor /4, 5/.

Bei diesen Experimenten zeigte es sich, daß, bedingt durch den konstruktiven Aufbau der Isolierung, beträchtliche Unterschiede im thermischen Verhalten der Teststrecke auftraten, je nachdem ob die Untersuchungen in horizontaler oder vertikaler Anordnung des Testrohres durchgeführt wurden.

Die Aufgabenstellung umfaßte daher nicht nur die Untersuchung des mechanischen Verhaltens der faserisolierten Teststrecke bei Druckentlastungen bei einer Gastemperatur von ca. 850°C und Druckentlastungsgeschwindigkeiten von ca. 15 - 21 bar/s. Aufgrund der Erfahrungen mit der Folienisolierung sollte im Druckentlastungsprüfstand nochmals das Isolationsverhalten der Teststrecken zwischen 500 und 900°C im Vakuumbereich und bei Drücken bis 38 bar gemessen werden. Vergleichbare Messungen in der ARGAS-Anlage liegen nur für Drücke von 4 und 6 bar vor.

3. Versuchsaufbau

3.1 Versuchsanlage

Das Gesamtkonzept der Versuchsanlage sowie die Funktion der Einzelkomponenten sind in früheren Berichten /1, 2/ detailliert beschrieben worden. Es wird deshalb hier nicht mehr darauf eingegangen.

Der bisherige Versuchsbetrieb hat gezeigt, daß die Anlage die Auslegungswerte, nämlich 900°C Gastemperatur bei einem Druck von 40 bar, erreicht und im Dauerbetrieb über mehrere hundert Stunden zuverlässig und störungsfrei arbeitet.

3.2 Druckrohr

Der Innendurchmesser des Druckrohres beträgt 880 mm, die Wandstärke 20 mm bei einer Gesamtlänge von 2950 mm. Als Auslegungsdruck wurde 40 bar gewählt bei einer maximalen Rohrwandtemperatur von 120°C. Zur Erfassung der Wärmeverluste wurde auf das Druckrohr ein mäanderförmig geführtes Kühlsystem aus Halbrohren aufgeschweißt mit vier Sektoren von 90° über den Umfang und einer Länge von 448 mm je Meßabschnitt. Auf diese Weise war das Testrohr in 5 Meßabschnitte eingeteilt. Die Meßabschnitte begannen bzw. endeten in einem Abstand von 250 mm von den Flanschen, die separat gekühlt wurden, um Fehlermöglichkeiten durch den Einfluß der Flanschzonen möglichst auszuschneiden. Der Abstand in achsialer Richtung zwischen den Kühlrohren betrug 100 mm. Eine das gesamte Testrohr umgebende Schaumgummiisolierung von 20 mm sollte den Wärmetransport vom Druckrohr zur Umgebung und umgekehrt unterbinden.

3.3 Kühlwasserfließschema

Eine schematische Darstellung der Anordnung und Schaltung der Kühlsysteme zeigt Abb. 1.

Die Einspeisung des Kühlwassers erfolgte am Anfang des Meßabschnittes 1 bzw. am Ende des Abschnittes 5 und gleichzeitig in die benachbarten Flanschzonen. Um keine Unterschiede in den Wassereintrittstemperaturen zu erhalten, wurden alle Zuleitungen gleich lang ausgeführt. Zur Vermeidung von achsialen Wärmeflüssen in der Testrohrwand mußten daher nur die Wasseraustrittstemperaturen auf den gleichen Wert gebracht werden. Der Vollständigkeit halber wurden in das Fließschema die Durchflußmengenmesser und die Temperaturmeßstellen mit eingetragen. Als Aufnehmer dienten: für die Wassermengen Schwebekörperdurchflußmengenmesser, für die Temperaturmeßstellen potentialfreie Ni-Cr-Mantelthermoelemente.

3.4 Isolierung

Eine Beschreibung der Isolierung wurde früher im internen Bericht HHT-HGV-85 Nr. 74-2 gegeben. Weil dieser Bericht nicht als allgemein bekannt angesehen werden kann, soll hier nochmals eine kurze Beschreibung erfolgen.

Die Isolierung wurde von der Firma Brown Boveri Sulzer Turbomaschinen AG Zürich in das von der KFA angelieferte Druckrohr eingebaut. Die Isolierung besteht aus einem metallischen Innenliner (Gasführungsrohr) mit Dehnungsausgleich (Schiebesitz) und mit Bohrungen, die am stromabwärts gerichteten Ende gleichmäßig über den Umfang verteilt sind, zum Druckausgleich. Der eigentliche Isolationsraum mit einer Dicke von ca. 140 mm, ursprünglich mit einer sehr dichten Stopfung der keramischen Kaowool-Faser versehen, wird vom Innenliner durch ein Lochblech getrennt, über das an einem Isolationschuß ein engmaschiges Drahtnetz gespannt ist, das den Austritt von Fasermaterial aus dem Isoliererraum verhindern soll. Der Isoliererraum wird durch ein konzentrisches Zwischenblech in zwei etwa gleichdicke Zonen aufgeteilt. Bei der Neustopfung der Teststrecke, die im Zusammenhang mit der Anbringung zusätzlicher Temperaturmeßstellen in der Isolierung erforderlich war, wurde eine Isolationshälfte ganz mit Kaowool gestopft, die andere nur im äußeren, relativ kalten Bereich. Die innere heiße Seite wurde mit Refrasil, einer reinen SiO_2 -Faser versehen, (siehe Abb. 2, schraffierter Bereich).

Die Zentrierung des Innenliners mit Lochblech erfolgte durch konische Bleche, die dicht mit dem Druckrohr verschweißt sind. An den Enden der beiden Isolierschüsse bestand eine weitere Abschottung des Isoliererraumes durch ein konisches Blech, das eine axiale Durchströmung des Fasermaterials wegen der in der Rohrleitung auftretenden Druckgradienten vermeiden sollte.

3.5 Meßbestückung

Die Meßbestückung des Versuchsstandes ist in /1/ bereits beschrieben worden. Einen Überblick über die Meßstellen an der Teststrecke vermittelt Abb. 2. Die Meßstellen der Wassertemperatur sind in der Abb. nur für eine Ebene eingetragen. Die Meßstellennumerierung läßt erkennen, daß vier Ebenen vorhanden sind entsprechend der 90° -Teilung des Kühlsystems.

Die Außenwandtemperaturen des Testrohres wurden in einer Ebene am Anfang, Mitte und Ende jedes Meßabschnittes in der Mitte zwischen zwei aufgeschweißten Kühlrohren gemessen. In der Umgebung der Stelle, an der das mittlere V-Blech mit dem Testrohr verschweißt ist, wurden zusätzliche Meßstellen platziert. Der Einfluß der metallischen Verbindung der Heißgasseite mit der gekühlten Außenwand hinsichtlich des Temperaturverlaufes in der Druckrohrwand sollte festgestellt werden.

Die Thermofühler am Innenliner sollten Aufschluß über das Temperaturprofil längs des Liners geben.

Ebenfalls am Innenliner, jedoch so befestigt, daß die Meßstellen in einer Druckentlastungsbohrung liegen, befanden sich zwei Thermoelemente (G44 und G45), die eine Messung der Gastemperatur während des Ausströmvorganges gestatten sollten. Wie Detail A zeigt, befanden sich in der Isolierung drei weitere Meßebenen, und zwar jeweils in der Mitte der Meßabschnitte 2 und 4 und am V-Blech. Die Meßebenen II und III erlaubten einen Vergleich der Temperaturprofile in der reinen Kaowool-Stopfung gegenüber der modifizierten, aus Refrasil und Kaowool bestehenden Stopfung.

Zusätzlich wurden im Testrohr zwei Druckmeßstellen eingebaut, wovon eine den Druck im freien Querschnitt registriert, die andere den Druckverlauf an der Innenwand des Druckrohres aufzeichnet.

Zur Aufnahme und zum Nachweis von eventuellen Schwingungen oder Verformungen des Innenliners wurde in halber Höhe eines Schusses ein induktiver Wegaufnehmer installiert.

4. Versuchsdurchführung

4.1 Thermische Untersuchungen bei evakuierter Teststrecke

Mit einer Drehschieber-Vakuumpumpe wurde der gesamte Versuchsstand evakuiert. Um das Ausgasen zu beschleunigen, wurde gleichzeitig die Heizung in Betrieb genommen. Nach Erreichen von 850°C Innenlinertemperatur und anschließender Abkühlung der Teststrecke konnte mit den Versuchen bei 500°C und einem Druck von 10^{-6} bar begonnen werden. Die Versuchsreihe wurde bei einer Temperatur von 900°C, gemessen am Innenliner in halber Höhe des unteren Isolationsschusses, abgeschlossen. Damit wurde die Messung der Verluste möglich, die durch Strahlung und Wärmeleitung des Isolier- und Strukturmaterials entstanden.

4.2 Thermische Untersuchungen in Helium

Im Anschluß an die Untersuchungen im Unterdruckbereich wurde mit den Messungen bei Überdruck begonnen. Kalorische Messungen wurden bei Drücken von 4, 10, 20, 30 und 38 bar vorgenommen im Temperaturbereich von 500 bis 950°C.

4.3 Druckentlastungsversuche

Die Versuche wurden bei Temperaturen von ca. 850°C gefahren. Durch Variation des Behälterdruckes und den Einsatz verschiedener Ausströmblenden konnte der Drucktransient auf etwa 16 bar/sec., gemessen im freien Querschnitt der Teststrecke, eingestellt werden. Es wurden 30 Druckentlastungsversuche durchgeführt. Durch einen Defekt am Schleifenoszillographen wurde in einem Fall der Ausgangsdruck zu hoch gewählt. Bei der anschließenden Druckentlastung wurde eine maximale Druckabsenkungsgeschwindigkeit von 22 bar/sec. gemessen.

5. Versuchsauswertung

Die Versuchsauswertung umfaßte die Bestimmung der Wärmestromdichte, der effektiven Wärmeleitfähigkeit und der Nusselt-Zahlen für die verschiedenen Meßabschnitte.

Das Verfahren wurde in /2/ bereits ausführlich beschrieben, ebenso die Bestimmung der maximalen Drucktransienten.

6. Versuchsergebnisse

6.1 Temperaturprofile am Innenliner

In Abb. 3 ist der Temperaturverlauf längs des Innenliners bei einem Druck von 38 bar in Abhängigkeit von der jeweiligen Betriebstemperatur eingetragen. Die Kurvenscharen sind durch lineare Verbindung der einzelnen Meßpunkte entstanden.

Die Ursache für den Temperaturabfall am oberen und unteren Ende der Teststrecke wurde in /2/ bereits eingehend erörtert. Es wird hier nicht mehr darauf eingegangen. Da die Abweichungen von der Solltemperatur in den Meßabschnitten 2, 3 und 4 relativ gering waren, wurden diese Abschnitte für die Auswertung herangezogen. Die Ergebnisse der Abschnitte 1 und 5 wurden in diesen Bericht nicht aufgenommen.

6.2 Kühlwasser- und Wandtemperaturen am Testrohr

In Abb. 4 ist die Anordnung der Meßstellen für Wasser- und Materialtemperaturen maßstäblich über einem Längsschnitt des Testrohres aufgetragen. Die untere Kurve T_w zeigt den Verlauf der Wassertemperatur, die obere T_M die Materialtemperatur an der Testrohr Außenwand. In der Umgebung des mittleren V-Blechtes wurden die Meßstellen für die Wandtemperatur sehr eng plazierte, um den Einfluß der metallischen Verbindung zwischen heißem Innenliner und kalter Rohrwand untersuchen zu können. Wie aus der Zeichnung ersichtlich, trat bei den eingestellten Betriebsbedingungen, nämlich 900°C und 38 bar Behälterdruck, an dieser Stelle eine Temperaturerhöhung von $19,5^{\circ}\text{C}$ auf. Wie eine überschlägige Rechnung zeigte, kann die in die Rohrwand transportierte Wärmemenge nicht allein durch die Wärmeleitung des relativ dünnen V-Blechtes entstanden sein. Es ist anzunehmen, daß in der Umgebung des Abschlußbleches - hervorgerufen durch die schlechte Zugänglichkeit und die engen Spalte - Stopfunregelmäßigkeiten auftraten. Eine zusätzliche Wärmeübertragung durch Konvektion in den entstandenen Hohlräumen wäre dann möglich.

Auffallend an der Darstellung ist die relativ große Differenz zwischen Wasser- und Wandtemperatur. Wenn man unterstellt, daß die Rohrwand an den wassergekühlten Flächen etwa Wassertemperatur annimmt, stellt die gerade Verbindung der Rohrwandtemperaturen eine grobe Vereinfachung dar. Bei einer entsprechenden Korrektur der Meßwerte würde die mittlere Wandtemperatur zweier benachbarter Meßpunkte zwischen die Wasser- und die Wandtemperatur zu liegen kommen.

6.3 Temperaturprofile in der Isolierung

Den Temperaturverlauf in der Isolierung bei einem Unterdruck von 10^{-6} bar an den Meßebeenen I bis III zeigen die Abbildungen 5 - 7. Zur Verdeutlichung der Lage der Meßstellen ist unterhalb der Diagramme ein Schnitt längs der Meßebene durch die Isolierung aufgezeichnet. Die Positionen der Meßstellen sind aus dem Schnittbild zu erkennen. Diesen Positionen entsprechen die lotrechten Linien in den über den Schnittbildern eingezeichneten Diagrammen.

Abb. 5 zeigt den Temperaturverlauf in radialer Richtung in der Meßebene II bei konstantem Druck und Innenlinertemperaturen von etwa 500, 600, 700 und 800°C .

Wegen Ausfall der Meßstellen am Lochblech in den Ebenen II und III, die beim Einbau der Teststrecke beschädigt worden waren, wurden die Temperaturen von Innenliner und der Meßstelle zwischen Lochblech und Zwischenblech linear verbunden. Die somit entstandenen Temperaturwerte am Lochblech sind in allen Fällen zu niedrig. Der zu erwartende Temperaturverlauf muß ähnlich dem sein, der in Abb. 7 zwischen Liner und Lochblech zu erkennen ist.

Vergleicht man die Abb. 5 und 6, so fällt auf, daß bei vergleichbaren Ausgangstemperaturen am Innenliner Temperaturunterschiede von über 100°C am Zwischenblech auftraten. Die Ursache für dieses Verhalten lag offensichtlich in den unterschiedlichen Stopfdichten und den physikalischen Eigenschaften der verwendeten Isoliermaterialien. In der Meßebe II befand sich eine reine Kaowool-Stopfung mit einer Dichte von ca. 300 kg/m^3 . Die Isolation in der Meßebe III bestand auf der heißen Seite aus Refrasilfasern mit einer Stopfdichte von ca. 180 kg/m^3 , auf der kalten Seite aus Kaowool-Fasern mit einer Dichte von ca. 300 kg/m^3 . Konvektion und Wärmeleitung der Fasern entfallen als Begründung für das Auftreten der größeren Temperatur am Zwischenblech bei der Refrasil-Kaowool-Isolierung. Konvektion konnte nicht auftreten, da die Versuche im Druckbereich von 10^{-6} bar durchgeführt wurden. Die in diesem Bereich vorhandenen Restgase reichen für eine konvektive Wärmeübertragung nicht mehr aus.

Wärmeleitung kommt als Ursache nicht in Frage, da sie bei Refrasil in derselben Größenordnung liegt wie bei Kaowool. Wegen der geringeren Stopfdichte müßte die durch Wärmeleitung übertragene Wärmemenge und damit die Temperatur geringer sein als bei der reinen Kaowool-Stopfung. Da nur noch die Möglichkeit der Wärmeübertragung durch Strahlung übrigbleibt, darf der Schluß gezogen werden, daß die Isolationsschicht aus Refrasil-Fasern für Strahlung durchlässiger ist als die Kaowool-Packung mit der größeren Dichte.

Abb. 7 zeigt die Temperaturprofile am V-Blech bei verschiedenen Linertemperaturen. Die Temperatur in der Mitte des Bleches ist wesentlich niedriger als an den vergleichbaren Stellen in den Meßebenen II und III. Der starke Temperaturabfall am Abschlußblech ist durch den Wärmetransport im Metall bedingt.

In den Abb. 8 - 13 ist der Temperaturverlauf in den Meßebenen I bis III aufgezeigt bei Linertemperaturen von ca. 500 , 600 , 700 und 800°C und Gasdrücken von 4 und 38 bar. Ein Vergleich der Kurvenzüge gleicher Ausgangstemperatur

läßt erkennen, daß eine Änderung des Druckes keine Auswirkung auf den Temperaturverlauf in der Isolierung hat. Dagegen ist auch bei den Messungen im Überdruckbereich ein deutlicher Unterschied zwischen der reinen Kaowool- und der Kaowool-Refrasil-Stopfung festzustellen. Die Temperaturen am Zwischenblech waren bei der Refrasil-Kaowool-Isolierung bis zu etwa 70°C höher als die in der reinen Kaowool-Isolation gemessenen.

Auffallend war weiterhin, daß die Temperaturen in der Mitte des V-Blechtes sich gegenüber der Messung im Vakuum um maximal 110°C erhöhten. Diese Temperaturerhöhung ist durch die hinzugekommene Wärmeleitung des ruhenden Gases nicht zu erklären. Darüber hinaus muß Wärme durch Konvektion übertragen worden sein, wie durch eine überschlägige Rechnung festgestellt wurde. Der früher geäußerte Verdacht, daß in der Umgebung des V-Blechtes geringere Stopfdichten oder sogar Hohlräume entstanden sind, die eine Konvektion ermöglichen, wurde durch das Meßergebnis bestätigt.

Überraschend ist auch ein Vergleich der an Meßebene III erzielten Ergebnisse. Bei der Messung im Vakuum betrug bei ca. 800°C Linertemperatur der Meßwert am Zwischenblech ca. 640°C. Im Überdruckbereich zeigte bei der entsprechenden Linertemperatur die Meßstelle am Zwischenblech nur noch ca. 500°C. Auf der heißen Seite in der Refrasilstopfung dominiert offenbar die Wärmestrahlung. Die durch die Leitfähigkeit des ruhenden Gases zusätzlich übertragene Wärmemenge macht sich auf der kalten Seite stärker bemerkbar als auf der heißen. Über die als Wärmesenke wirkende gekühlte Rohrwand fließt über das Arbeitsmedium soviel Wärme, daß die Temperatur am Zwischenblech bei Druck niedriger wird als unter Vakuum.

6.4 Wärmestromdichte

Die Abb. 14 - 16 zeigen die Ergebnisse der kalorischen Messungen an den Meßabschnitten 2, 3 und 4. Der Meßbereich umfaßte auf der Druckseite 10^{-6} bis 38 bar, auf der Temperaturseite 500 - 950°C. Auf die Eintragung der Ergebnisse bei Drücken von 10 und 30 bar wurde wegen der besseren Übersichtlichkeit verzichtet.

Vergleicht man die Ergebnisse der Abschnitte 2 und 4 miteinander, so findet man eine sehr gute Übereinstimmung. Sofern die im vorangegangenen Kapitel angestellten Betrachtungen zutreffen, müßten die Verluste im Meßabschnitt 2, der die Refrasil-Kaowool-Stopfung enthält, höher sein als im Meßabschnitt 4.

Tatsächlich zeigen die Kurven einen erkennbaren Unterschied.

Die Diagramme klären auch die Frage, ob in Fasermaterialien der gewählten Struktur und Stopfdichte noch Konvektionsbewegungen des Gases auftreten. Für die Wärmeübertragung im Vakuum sind nur Wärmeleitung des Materials und Wärmestrahlung verantwortlich. Schließt man Konvektion aus, dann müßte die Addition der im Vakuum gemessenen Werte mit den bekannten Werten der Wärmeleitfähigkeit des ruhenden Gases bei gegebenem Druck und verschiedener Temperatur identisch sein mit den im Überdruckbereich gemessenen Werten. Dies trifft jedoch in keinem Falle zu. Die aus der Messung gewonnenen Werte liegen alle höher als die auf die beschriebene Weise gewonnenen. Folgerung: Auch in einer Faserisolierung der vorliegenden Art wird Wärme konvektiv übertragen. Die Meßabschnitte 2 und 4 zeigen diesen Unterschied deutlich. Extrem ausgeprägt ist er jedoch am Meßabschnitt 3, der das V-Blech enthält. Bei 800°C und 20 bar z.B. sind die gemessenen Verluste um den Faktor 2,5 größer als sie sein dürften, wenn keine Wärmeübertragung durch Konvektionsbewegungen stattgefunden hätte. Die deutlich höheren Verluste im Diagramm Abb. 18 untermauern die früher geäußerte These, daß in der Umgebung des V-Blechtes geringere Packungsdichten oder sogar Hohlräume entstanden sein müssen, die die Konvektion begünstigen.

6.5 Wärmeleitfähigkeit und Nusselt-Zahlen

In den Abb. 17 - 19 wurden die Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit vom Druck und von der Linertemperatur dargestellt. Wie schon bei den Wärmestromdichten festgestellt, besteht auch bei der effektiven Wärmeleitfähigkeit eine gute Übereinstimmung in den Ergebnissen der Meßabschnitte 2 und 4. Die Leitfähigkeit betrug z.B. im Meßabschnitt 2 (Abb. 18) für einen Druck von 20 bar $0,415 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ bei 500°C und stieg auf $0,5 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ bei einer Temperatur von 800°C. Die entsprechenden Werte für den Meßabschnitt 4 (Abb. 17) waren 0,37 und $0,48 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$. Auch hier zeigte sich wieder der Einfluß der Refrasil-Stopfung.

Wie aus den Diagrammen zu erkennen ist, bestand nur eine geringe Abhängigkeit vom Druck. Eine Abhängigkeit von der Temperatur ist dagegen nicht festzustellen, wie aus den Diagrammen Abb. 20 - 22 zu erkennen ist. Der Anstieg bei Erhöhung der Temperatur ist auf die mit der Temperatur steigende Leitfähigkeit des ruhenden Gases zurückzuführen.

Die für den Meßabschnitt 3 ermittelten Werte liegen wieder wesentlich über denen der angrenzenden Zonen. Hier machte sich nicht nur die erhöhte Wärmeströmdichte, wie sie Abb. 18 zeigte, bemerkbar, sondern auch die in diesem Meßabschnitt deutlich höhere mittlere Wandtemperatur (s. Abb. 4).

In den Diagrammen 20 - 22 ist der Verlauf der Nusselt-Zahlen ebenfalls in Abhängigkeit von Druck und von der Linertemperatur aufgetragen. Der beinahe horizontale Verlauf der Linienzüge entstand durch die Einführung der Leitfähigkeit des ruhenden Heliums bei der in der Mitte der Isolierung gemessenen Gas- bzw. Isolationstemperatur.

Die fallende Tendenz der für den Abschnitt 2 gemessenen Werte hängt ursächlich mit der am Zwischenblech aufgetretenen höheren Temperatur in der Refrasil-Kaowool-Stopfung zusammen. Für alle drei untersuchten Meßabschnitte ist eine weitgehende Unabhängigkeit der Nusselt-Zahlen von der Gastemperatur festzustellen.

6.6 Druckentlastungsversuche

Nach Abschluß der thermischen Untersuchungen wurde das Verhalten der Teststrecke bei schnellen Druckabsenkungen untersucht. Es sollten 30 Druckentlastungsversuche bei einer Druckabsenkungsgeschwindigkeit von 15 bar/sec. gefahren werden. Die Versuche begannen mit einem Systemdruck von 19 bar, wobei eine Absenkungsgeschwindigkeit von 17 bar/sec. erreicht wurde. Wegen eines Defektes am Papiervorschub des Schleifenzillographen wurden bei Versuch Nr. 2 die Ausgangsparameter falsch gewählt, wodurch sich ein $\frac{dP}{dt}$ von 22 bar/sec. ergab. Durch Variation der Ausströmlende und des Systemdruckes konnte schließlich eine Absenkungsgeschwindigkeit von ungefähr 16 bar/sec. eingehalten werden.

Ab Versuch Nr. 13 lag der Behälterdruck bei ca. 34 bar, die Linertemperatur bei ca. 850°C.

Einen genauen Überblick über den Ablauf der Versuche vermittelt die folgende Tabelle:

Versuch Nr.	Ausgangs- druck bar	Temperatur °C	P ₅ nach 0,75 sec bar	P ₃ nach 0,75 sec bar	$\frac{dP}{dt}$ max
1	19	855	12,21	12,50	17
2	30	863	17,61	18,24	22
3	20	845	13,40	13,48	14,2
4	20	840	12,76	13,12	14,0
5	22	835	14,15	14,54	15,5
6	21	850	13,13	13,28	15,1
7	21	845	13,30	13,71	15,1
8	21	845	13,67	12,91	14,0
9	21	840	13,22	13,99	14,6
10	21	845	13,90	14,18	14,6
11	21	855	14,13	14,53	14,2
12	21	848	13,66	13,91	15,1
13	35	850	26,30	26,46	16,2
14	34	845	25,17	25,51	15,2
15	34	855	25,21	25,26	15,8
16	34	855	25,33	25,91	16,0
17	34	853	24,55	24,87	15,9
18	34	850	25,38	25,67	15,6
19	34	845	25,33	25,27	15,3
20	34	845	25,92	26,11	15,8
21	34	850	25,09	25,15	15,9
22	34	850	24,89	25,08	15,9
23	34	845	24,95	25,35	15,9
24	34	850	25,41	25,25	16,0
25	34	848	24,88	25,03	15,8
26	34	850	25,34	25,38	15,9
27	34	850	25,06	25,14	15,9
28	34	845	25,49	25,48	16,0
29	34	850	25,12	25,24	15,9
30	34	850	25,00	25,21	15,9

Wie aus Abb. 2 hervorgeht, erfaßte die Meßstelle P_5 den Druckverlauf im freien Querschnitt des Testrohres, P_3 den Druckverlauf an der Innenwand des Druckgefäßes. Beide Meßstellen lagen in derselben Ebene.

Es hat sich gezeigt, daß die maximale Druckdifferenz zwischen den beiden Meßstellen etwa 0,75 Sekunde nach Beginn des Ausströmvorganges auftrat. Die Versuche Nr. 18, 21, 22, 24, 27, 29 und 30 haben bezüglich Druck und Temperatur dieselben Ausgangsbedingungen. Bildet man für diese die Differenz $P_5 - P_3$ und mittelt die Ergebnisse, so ergibt sich ein mittlerer Überdruck von 0,15 bar, der an der Innenwand des Testrohres auftrat. Geht man davon aus, daß sich in der Faserpackung radial kein meßbares Druckgefälle ausbildete, dann war der den Innenliner auf Beulung beanspruchende Druck von der Größenordnung $P = 0,15 \text{ kp/cm}^2$. Gemäß Auslegung des Herstellers sollte der zulässige Beuldruck $P = 1 \text{ kp/cm}^2$ bei einer Materialtemperatur von 850°C betragen dürfen. Eine Beschädigung des Innenliners war unter den gegebenen Versuchsbedingungen nicht zu erwarten und trat auch nicht auf. Dies konnte bei einer Inspektion, die nach Abschluß der Versuche vorgenommen wurde, bestätigt werden.

Der am Innenliner befestigte Wegaufnehmer zeigte keine Schwingungen des Liners während der Druckentlastung. Die Auswertung des Signals dieses Aufnehmers ergab eine radiale Verschiebung des Innenliners, die, allseitige Kontraktion vorausgesetzt, einer Abkühlung des Gasführungsrohres um ca. 7°C während des Ausströmungsvorganges entsprach.

Die über den Druckentlastungsbohrungen und in der Heißgasleitung angebrachten Miniaturmantelthermoelemente zeigten wegen zu großer Trägheit keine realistischen Werte der Gastemperatur an. In der Heißgasleitung wurde z.B. eine Temperaturabsenkung um 250°C auf 600°C gemessen. Unter Annahme einer adiabaten Entspannung auf 1 bar müßte theoretisch eine Temperatur von 0°C erreicht worden sein.

7. Zusammenfassung

Im Druckentlastungsversuchsstand wurde eine senkrecht angeordnete Teststrecke mit einer Innenisolierung aus keramischen Fasern untersucht. Die Länge der Teststrecke betrug 2950 mm. Der lichte Durchmesser des Gasführungsrohres war 580 mm bei einer Dicke der Isolierung von ca. 150 mm. Zur Erfassung der

Wärmeverluste an der Außenwand des Druckrohres diente ein mäanderförmig aufgeschweißtes Kühlsystem, das axial in 5 Meßabschnitte unterteilt war. Eine Schaumstoffisolierung von 20 mm Dicke verhinderte den Wärmeaustausch zwischen Rohrwand und Umgebungsluft.

Neben den Kühlwasser-, Wand- und Linertemperaturen wurde besonders die Temperaturverteilung in drei Ebenen in der Isolierung gemessen. Je eine Meßebene befand sich in der Mitte eines Isolationsschusses. Die dritte Meßebene wurde durch das V-Blech gebildet.

Thermische Untersuchungen wurden zuerst im Bereich von 10^{-6} bar bei Gastemperaturen von 500 - 950°C durchgeführt. Sie dienten der Bestimmung der Wärmeleitungs- und Strahlungsverluste im Vakuum. Anschließend wurden Messungen der Wärmeverluste bei Drücken bis 38 bar im Temperaturbereich von 500 - 900°C vorgenommen. Mit den gemessenen kalorischen Werten wurden für drei Meßabschnitte die Wärmeleitfähigkeit und die Nusselt-Zahlen bestimmt. Die ermittelten Werte zeigten keine Temperatur- und eine nur geringe Druckabhängigkeit. In dieser Hinsicht unterscheidet sich die Faserisolierung deutlich von der früher getesteten Folienisolierung /2/. Die freie Konvektion im Fasermaterial mit Stopfdichten oberhalb von 180 kg/m^2 ist nur gering. Sie nimmt jedoch stark zu an Stellen mit geringerer Dichte bzw. unregelmäßiger Stopfung (V-Blech).

Den Abschluß der Experimente bildeten 30 Druckentlastungsversuche bei Entlastungsgeschwindigkeiten von ca. 16 bar/sec und Linertemperaturen von etwa 850°C.

Die Untersuchungen erwiesen die Brauchbarkeit der Testisolierung hinsichtlich Druckentlastungs- und Wärmedämmverhalten.

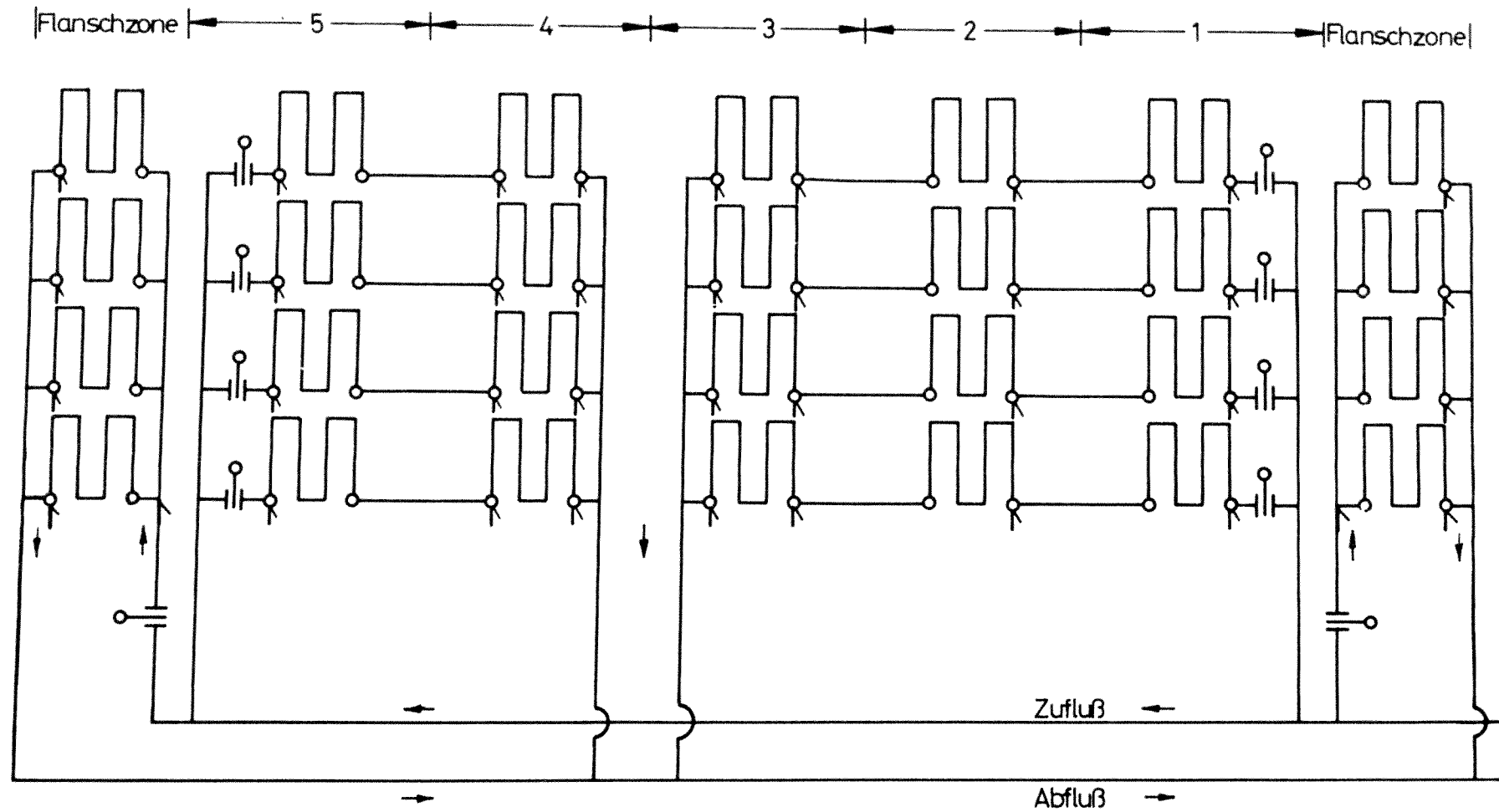
8. Literaturverzeichnis

- /1/ Bruners, R., Kolb, F., Lang, H., Noack, G.:
Versuche an Heißgasisolierungen im Hinblick auf den Einsatz in
HHT-Anlagen
Jül-916-TP, Januar 1973
- /2/ Henssen, J., Lang, H., Lonzen, G., Noack, G.:
Untersuchungen an einer Metallfolienisolierung in der ARGAS-Anlage
und im Druckentlastungsversuchsstand
Jül-1318, Juli 1976
- /3/ Bruners, R., Lang, H., Noack, G.:
Untersuchungen an einer Faserisolierung mit Kaowool-Stopfung
Interner Bericht der KFA und HRB HHT-HGV-85 Nr. 74-2, Juni 1974
- /4/ Bröckerhoff, P., Scholz, F.:
Untersuchungen an zwei gestopften Faserisolierungen in einem
horizontalen Druckrohr
Jül-1241, Oktober 1975
- /5/ Bröckerhoff, P., Scholz, F.:
Untersuchungen an einer Folienisolierung in einem horizontalen
Druckrohr
Jül-1109-RB, September 1974
- /6/ Harth, R., Hammeke, K.:
Thermodynamische Stoffwerte von Helium im Bereich 0-3000⁰C und
0,2 bis 200 bar
Jül-666-RB, Juni 1970

9. Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1 Kühlwasserfließschema der Teststrecke
- Abb. 2 Schnittzeichnung der Teststrecke mit Meßbestückung
- Abb. 3 Temperaturverlauf längs des Innenliners bei einem Druck von 38 bar und verschiedenen Linertemperaturen
- Abb. 4 Verlauf von Kühlwassertemperatur T_W und Materialtemperatur T_M an der Außenwand des Testrohres bei 900°C und 38 bar
- Abb. 5 Temperaturverlauf in der Isolation mit reiner Kaowoolstopfung bei einem Druck von 10^{-6} bar und verschiedenen Linertemperaturen
- Abb. 6 Temperaturverlauf in der Isolation mit Refrasilstopfung auf der Heißgasseite bei einem Druck von 10^{-6} bar und verschiedenen Linertemperaturen
- Abb. 7 Temperaturverlauf am mittleren V-Blech bei einem Druck von 10^{-6} bar und verschiedenen Linertemperaturen
- Abb. 8 Temperaturverlauf in der Isolation mit reiner Kaowoolstopfung bei einem Druck von 4 bar und verschiedenen Linertemperaturen
- Abb. 9 Temperaturverlauf in der Isolation mit Refrasilstopfung auf der Heißgasseite bei 4 bar und verschiedenen Linertemperaturen
- Abb. 10 Temperaturverlauf am mittleren V-Blech bei einem Druck von 4 bar und verschiedenen Linertemperaturen
- Abb. 11 Temperaturverlauf in der Isolation mit reiner Kaowoolstopfung bei einem Druck von 38 bar bei verschiedenen Linertemperaturen
- Abb. 12 Temperaturverlauf in der Isolation mit Refrasilstopfung auf der Heißgasseite bei einem Druck von 38 bar und verschiedenen Linertemperaturen

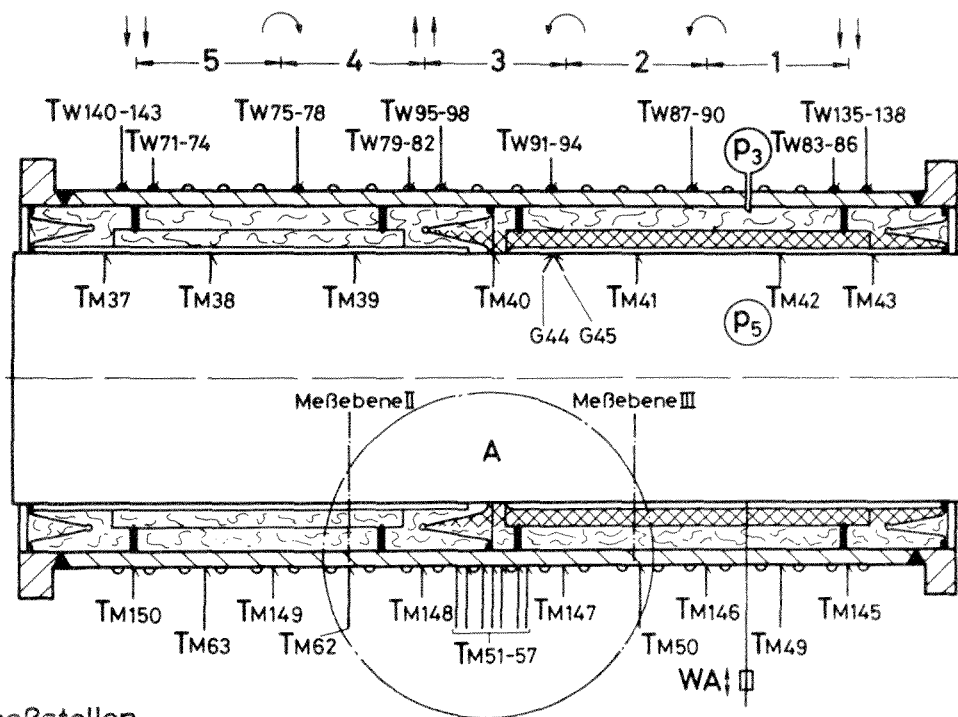
- Abb. 13 Temperaturverlauf am mittleren V-Blech bei einem Druck von 38 bar und verschiedenen Linertemperaturen
- Abb. 14 Wärmestromdichte für die Isolation mit reiner Kaowoolstopfung (Meßabschnitt 4) bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Temperatur
- Abb. 15 Wärmestromdichte für die Isolation mit Refrasilstopfung auf der Heißgasseite (Meßabschnitt 2) bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Temperatur
- Abb. 16 Wärmestromdichte am mittleren V-Blech (Meßabschnitt 3) bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Temperatur
- Abb. 17 Wärmeleitfähigkeit für die Isolation mit reiner Kaowoolstopfung bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Linertemperatur
- Abb. 18 Wärmeleitfähigkeit für die Isolation mit Refrasilstopfung auf der Heißgasseite bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Linertemperatur
- Abb. 19 Wärmeleitfähigkeit am mittleren V-Blech bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Linertemperatur
- Abb. 20 Nusselt-Zahlen für die Isolation mit reiner Kaowoolstopfung bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Linertemperatur
- Abb. 21 Nusselt-Zahlen für die Isolation mit Refrasilstopfung auf der Heißgasseite bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Temperatur
- Abb. 22 Nusselt-Zahlen am mittleren V-Blech bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Linertemperatur



T = Temperaturmeßstelle

Q = Durchflußmengenmesser

Abb. 1 Kühlwasserfließschema der Teststrecke



Temperaturmeßstellen

Wassertemperaturen TW71-98 / TW140-143 / TW135-138

Materialtemp. Druckrohr - Außenwand TM49-57 / TM62-63 / TM145-150

Materialtemp. Innenmantel TM37-43

Materialtemp. in der Isolierung TM120-134

Gastemp. an der Druckentlastungsbohrung G44 - 45

Druckmeßstellen

Druckverlauf an der Innenwand des Rohres P3

Druck im freien Querschnitt P5

Wegmessung am Innenliner WA

Detail A

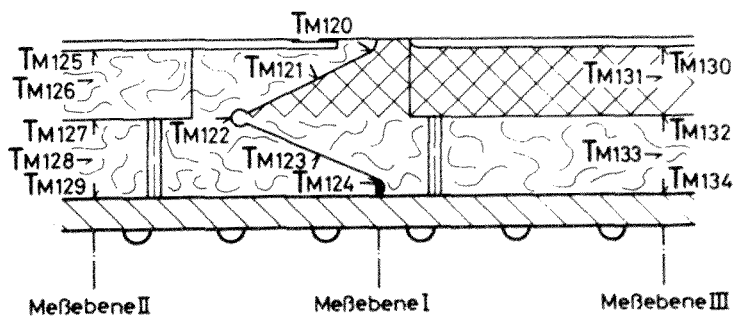


Abb. 2 Schnittzeichnung der Teststrecke mit Meßbestückung

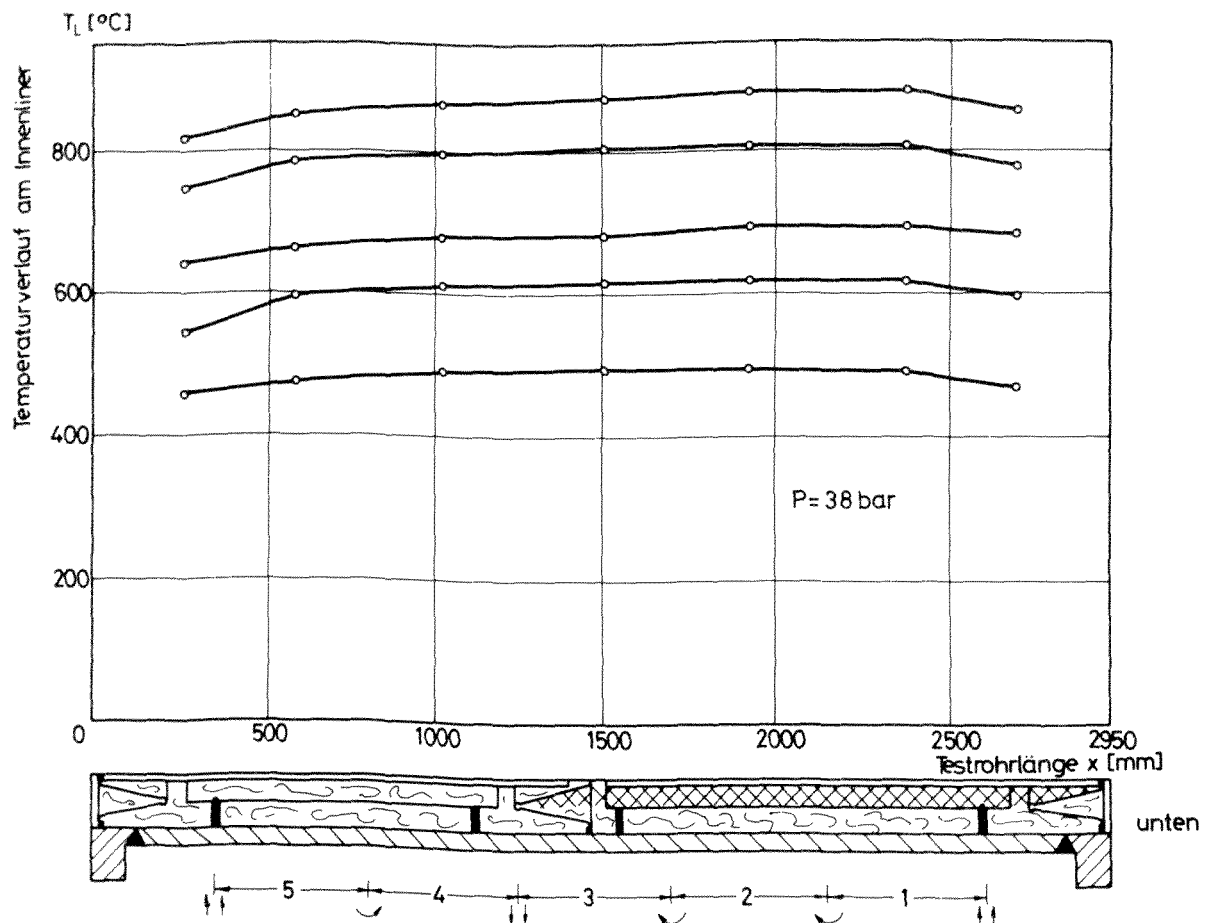


Abb. 3 Temperaturverlauf längs des Innenliners bei einem Druck von 38 bar und verschiedenen Linertemperaturen

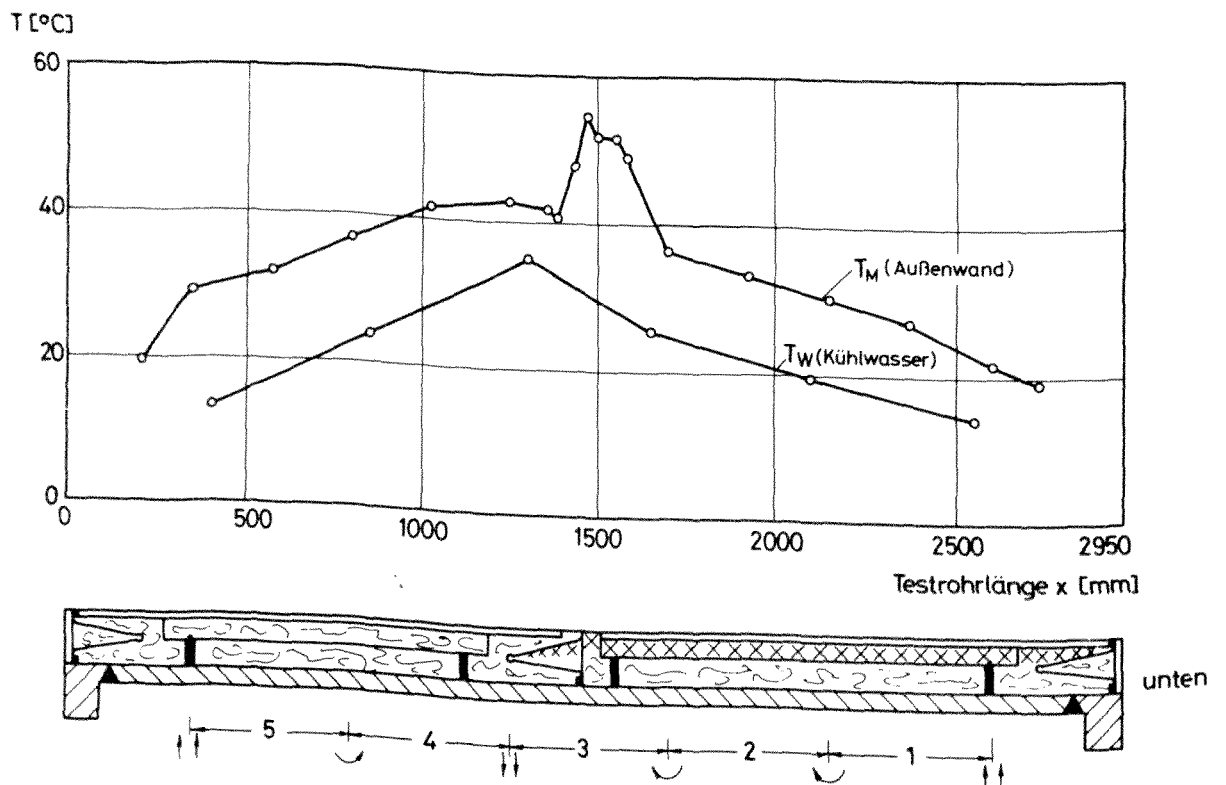


Abb. 4 Verlauf von Kühlwassertemperatur T_W und Materialtemperatur T_M an der Außenwand des Testrohres bei 900 °C und 38 bar

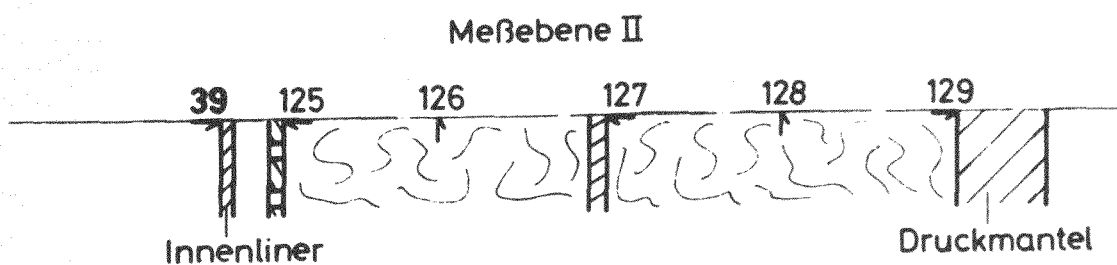
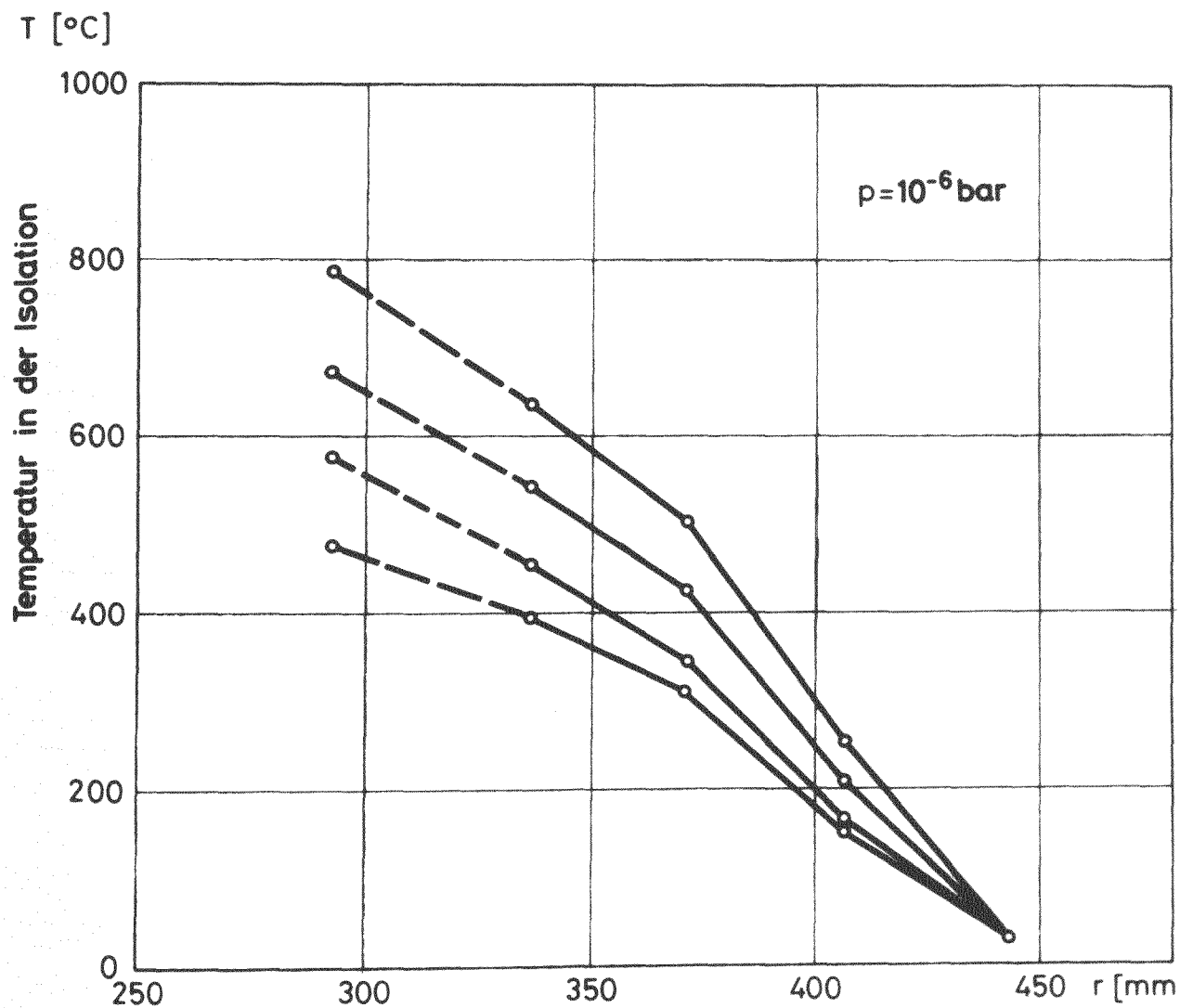


Abb. 5 Temperaturverlauf in der Isolation mit reiner Kaowoolstopfung bei einem Druck von 10^{-6} bar und verschiedenen Linertemperaturen

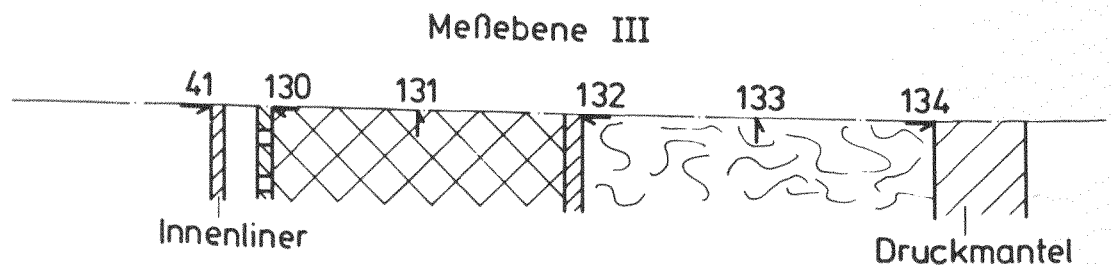
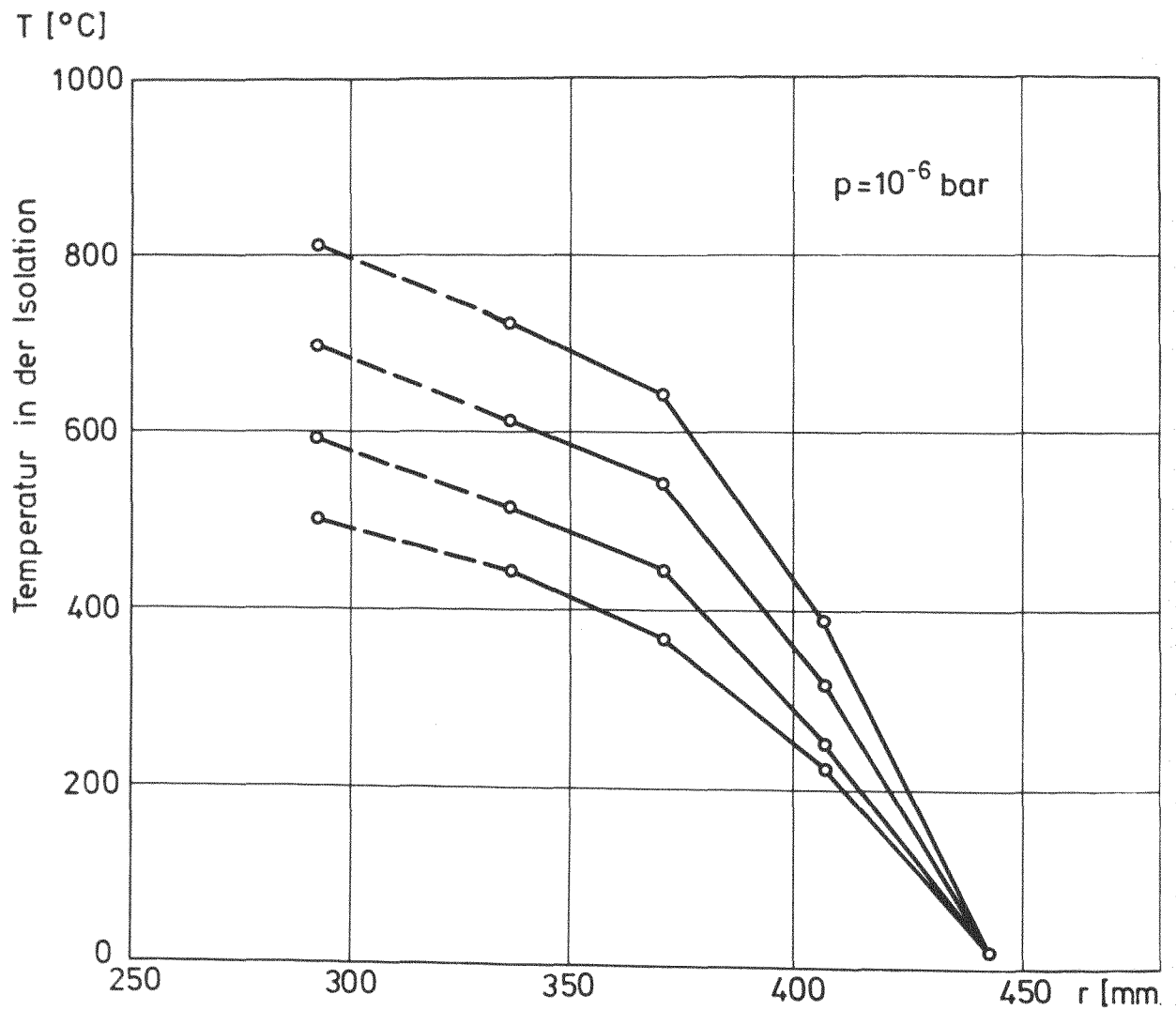


Abb. 6 Temperaturverlauf in der Isolation mit Refrasilstopfung auf der Heißgasseite bei einem Druck von 10^{-6} bar und verschiedenen Linertemperaturen

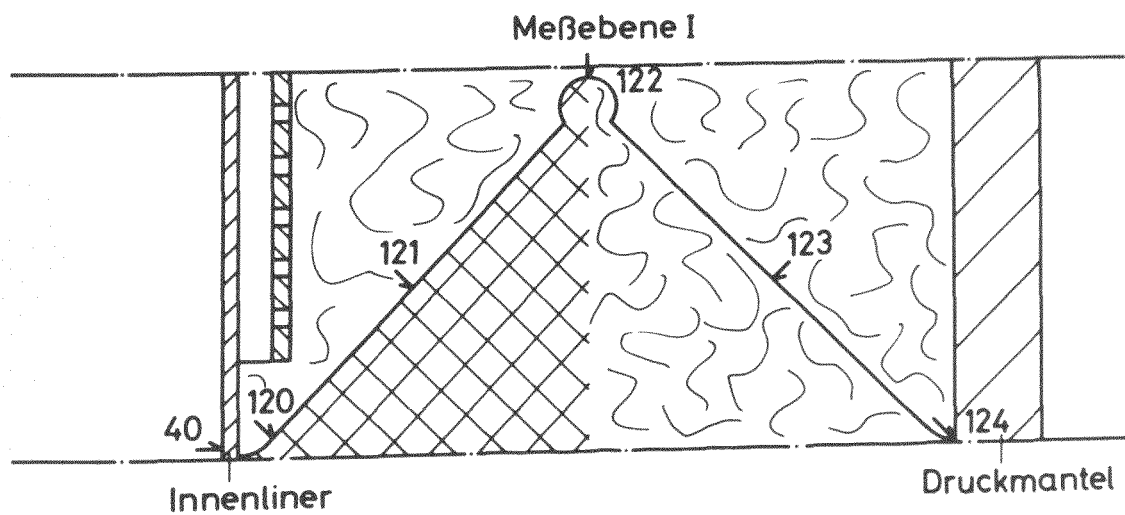
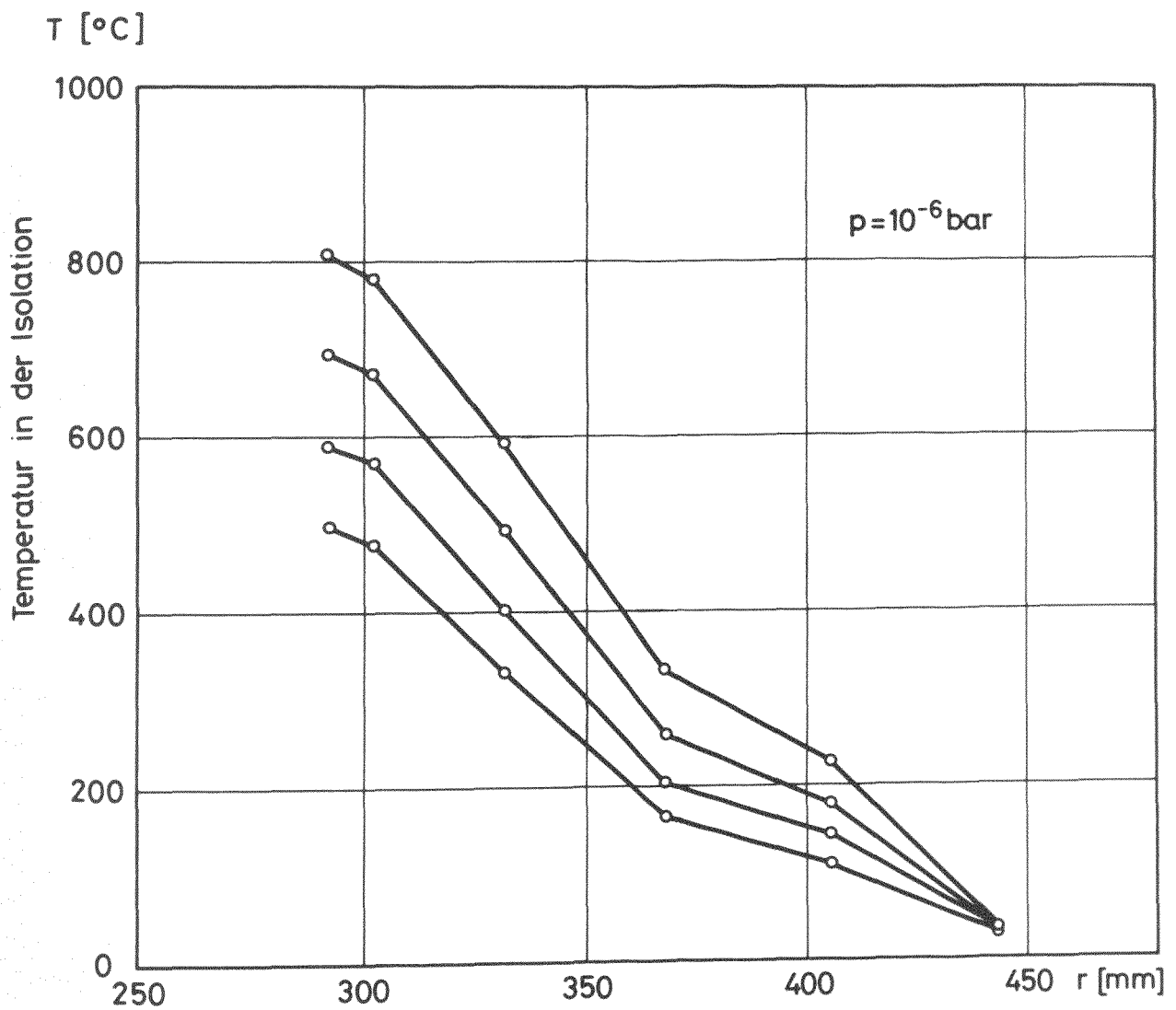


Abb. 7 Temperaturverlauf am mittleren V-Blech bei einem Druck von 10^{-6} bar und verschiedenen Linertemperaturen

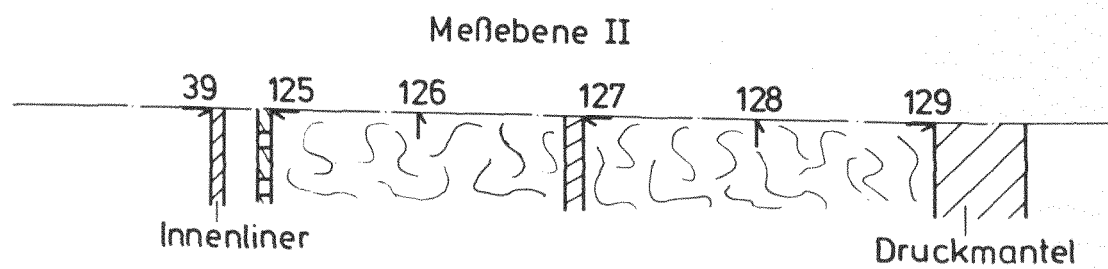
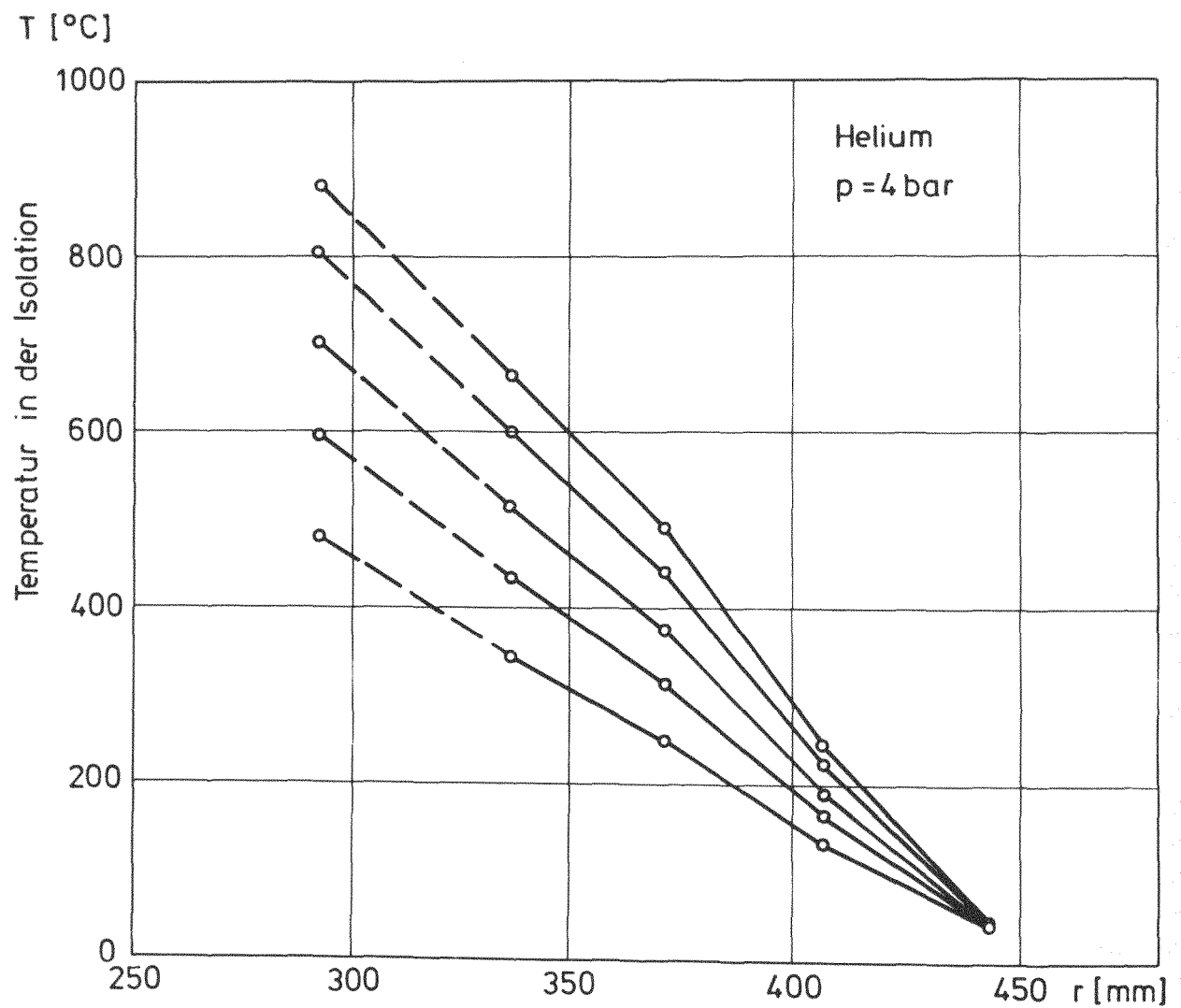


Abb. 8 Temperaturverlauf in der Isolation mit reiner Kaowoolstopfung bei einem Druck von 4 bar und verschiedenen Linertemperaturen

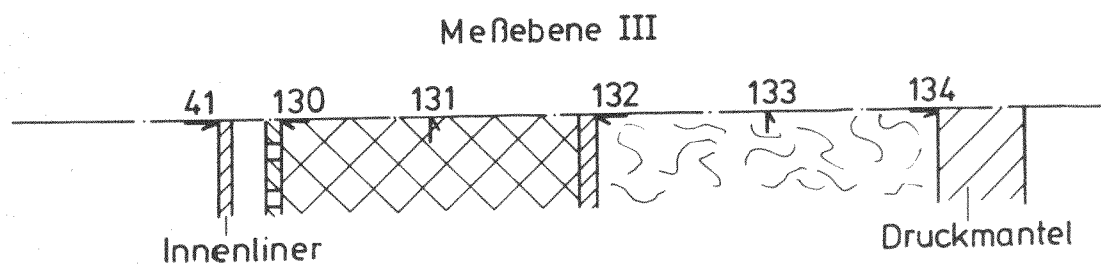
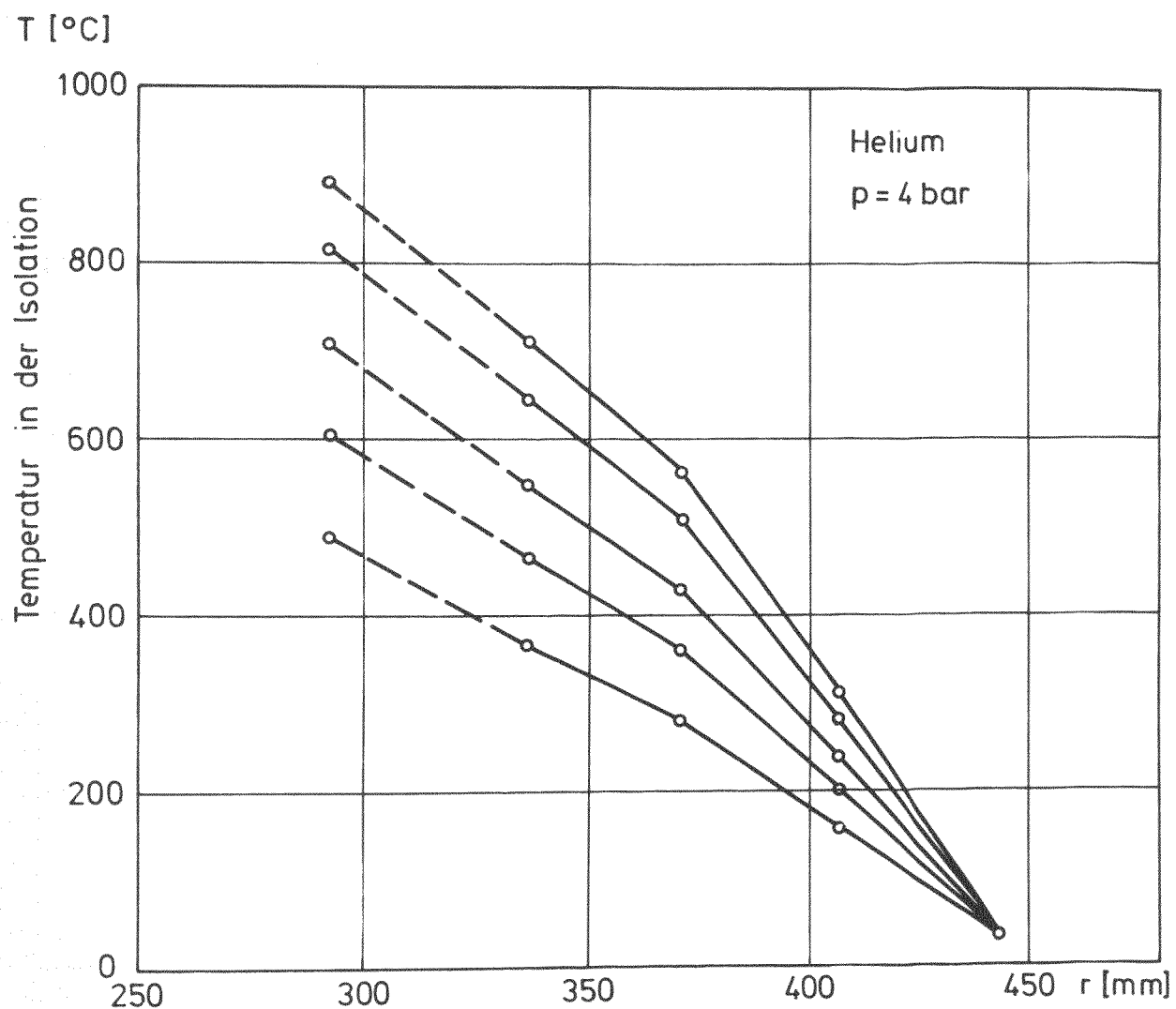


Abb. 9 Temperaturverlauf in der Isolation mit Refrasilstopfung auf der Heißgasseite bei 4 bar und verschiedenen Linertemperaturen

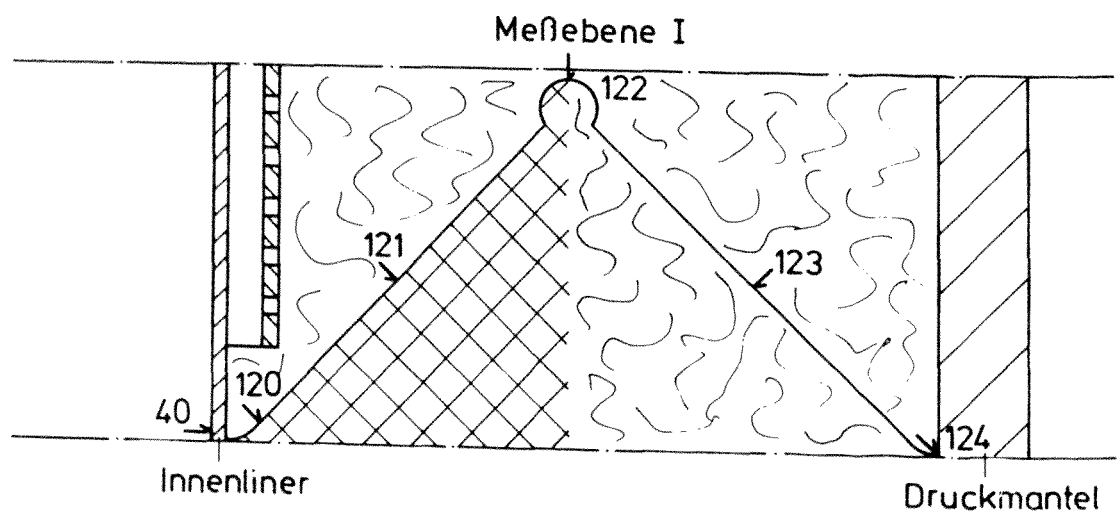
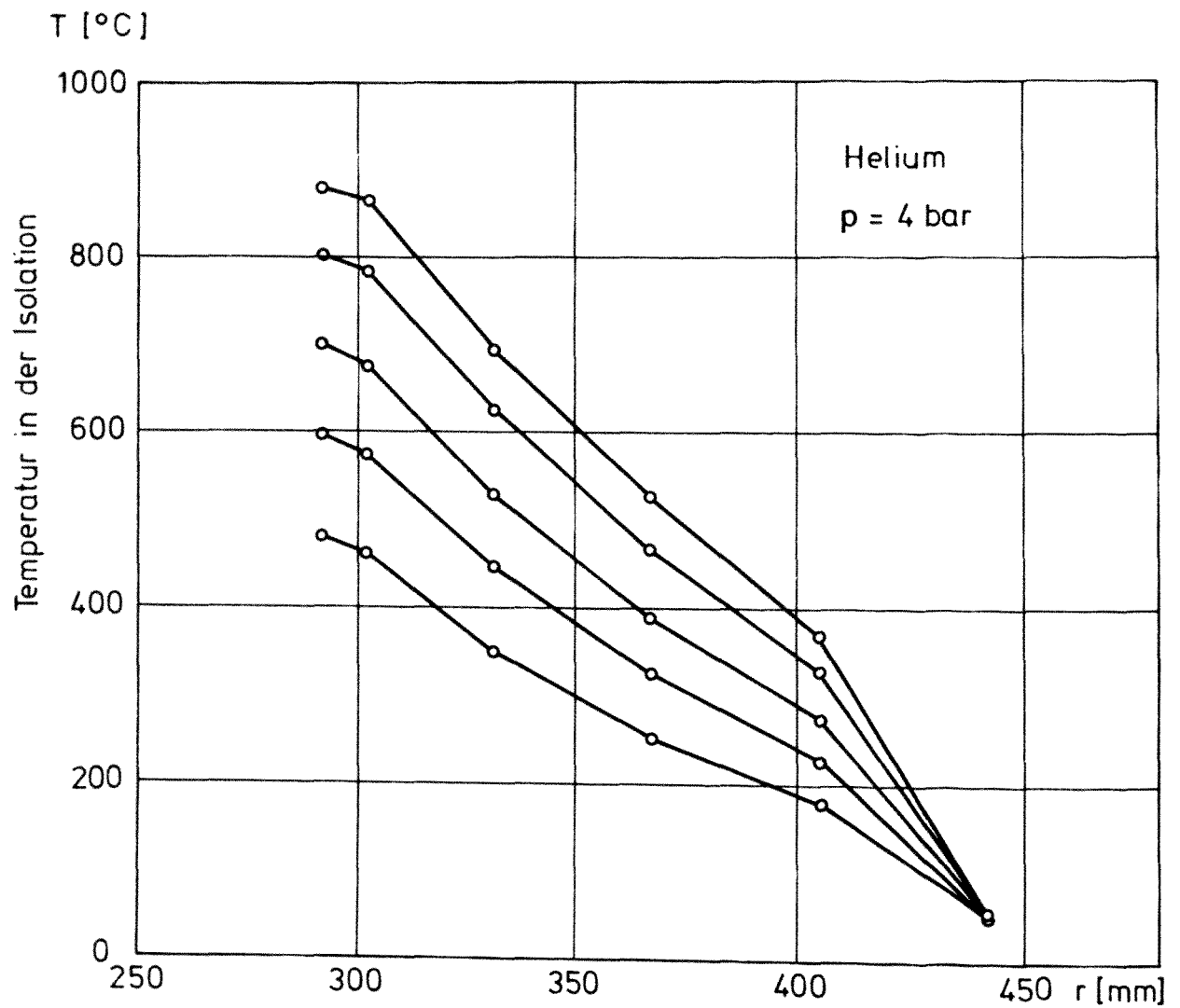


Abb. 10 Temperaturverlauf am mittleren V-Blech bei einem Druck von 4 bar und verschiedenen Linertemperaturen

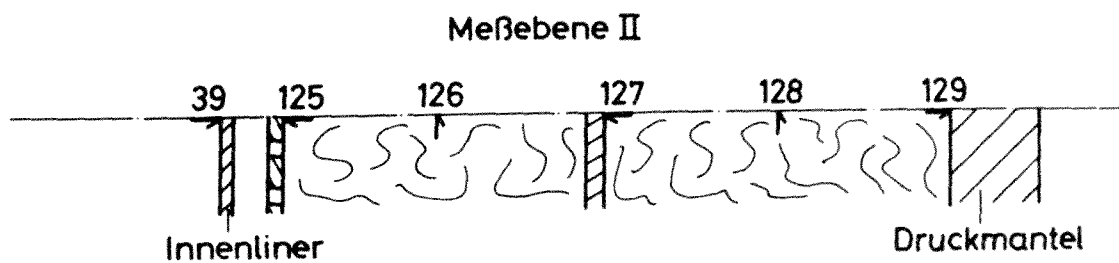
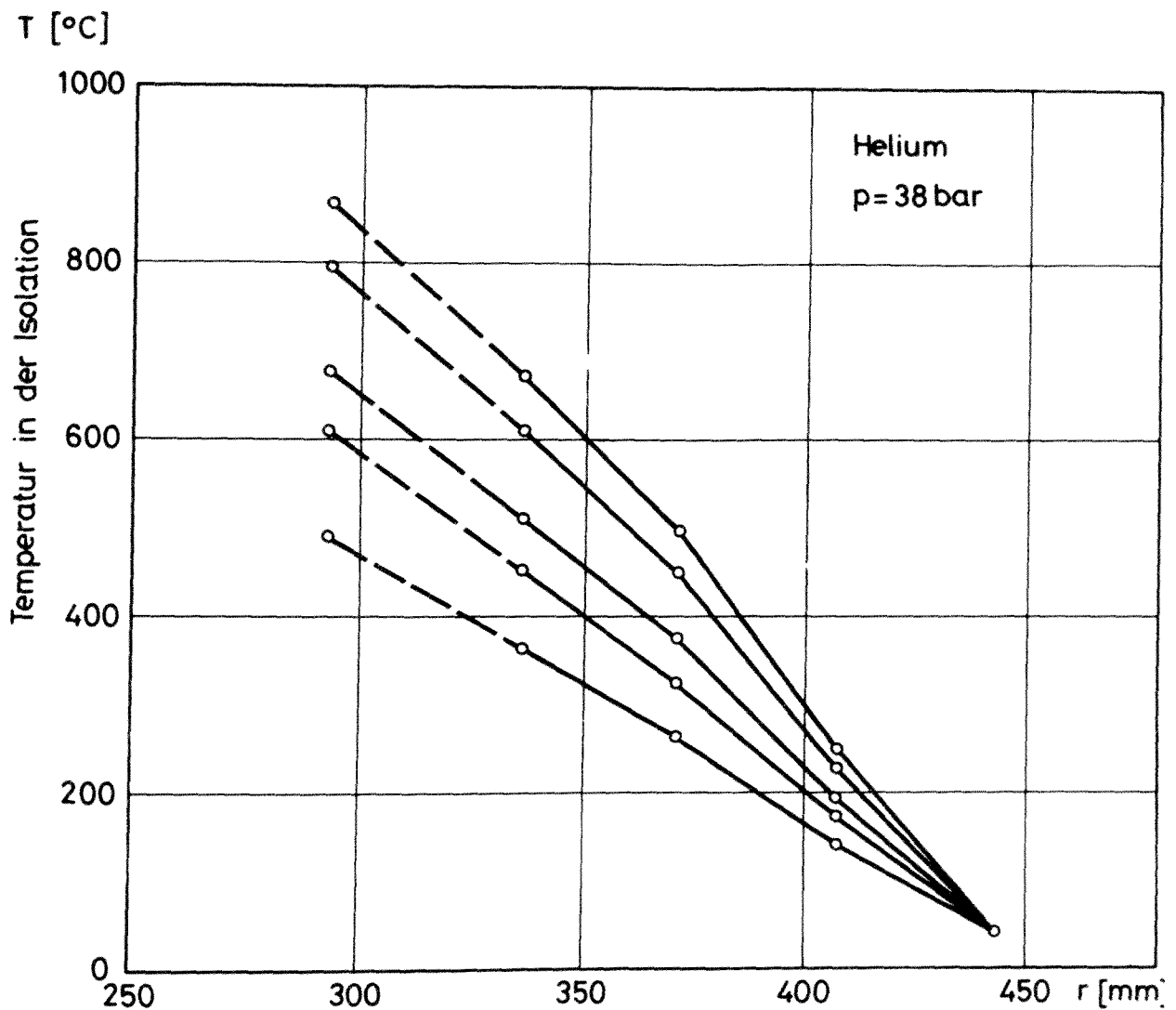


Abb. 11 Temperaturverlauf in der Isolation mit reiner Kaowoolstopfung bei einem Druck von 38 bar bei verschiedenen Linertemperaturen

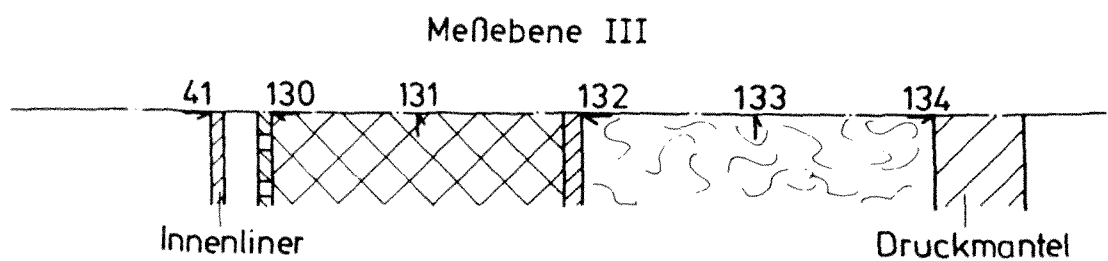
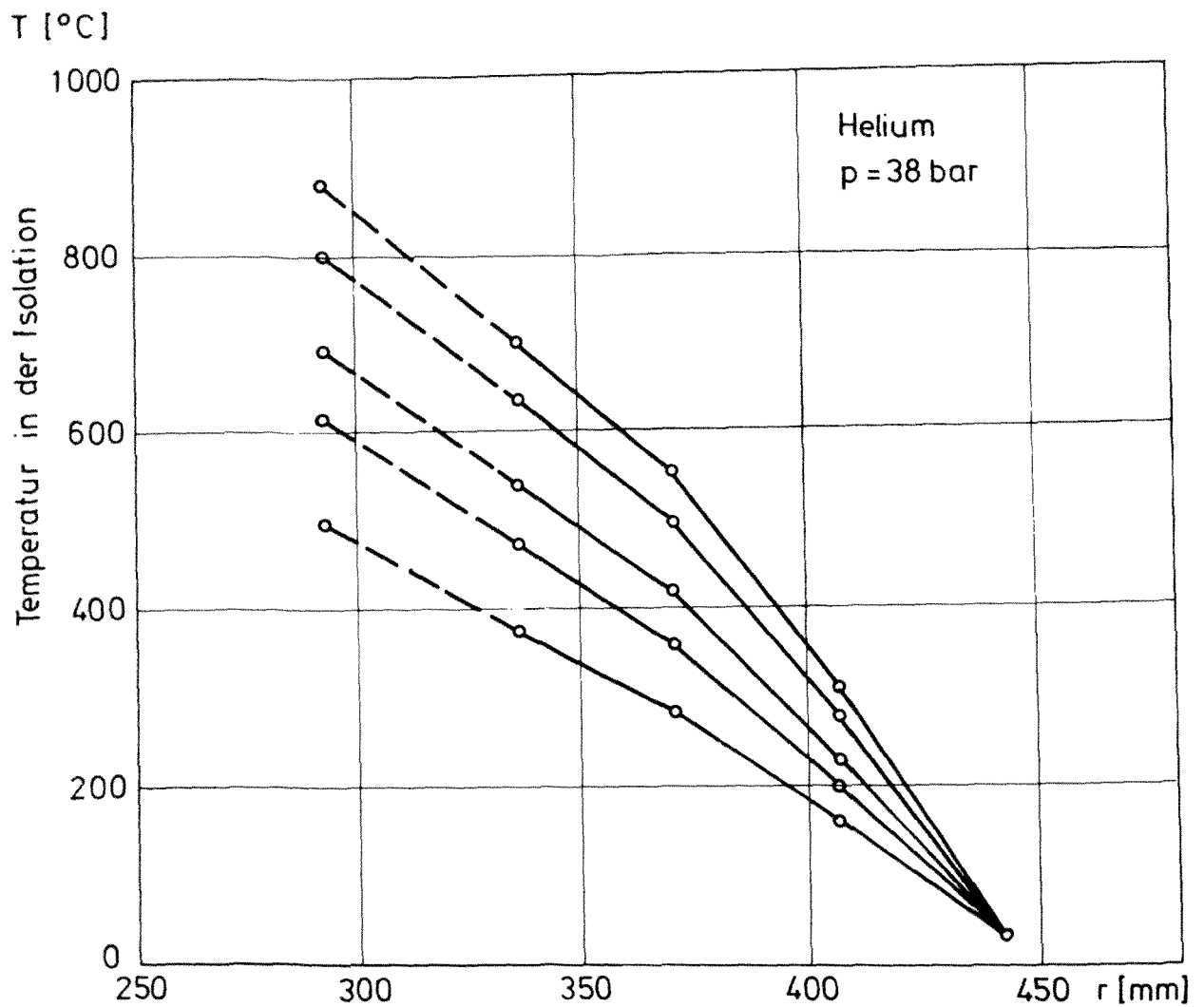


Abb. 12 Temperaturverlauf in der Isolation mit Refrasilstopfung auf der Heißgasseite bei einem Druck von 38 bar und verschiedenen Linertemperaturen

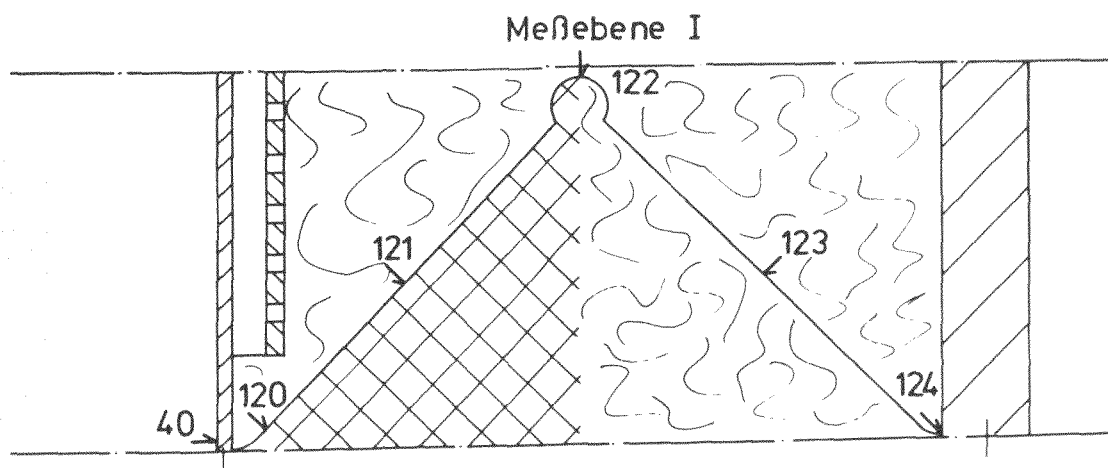
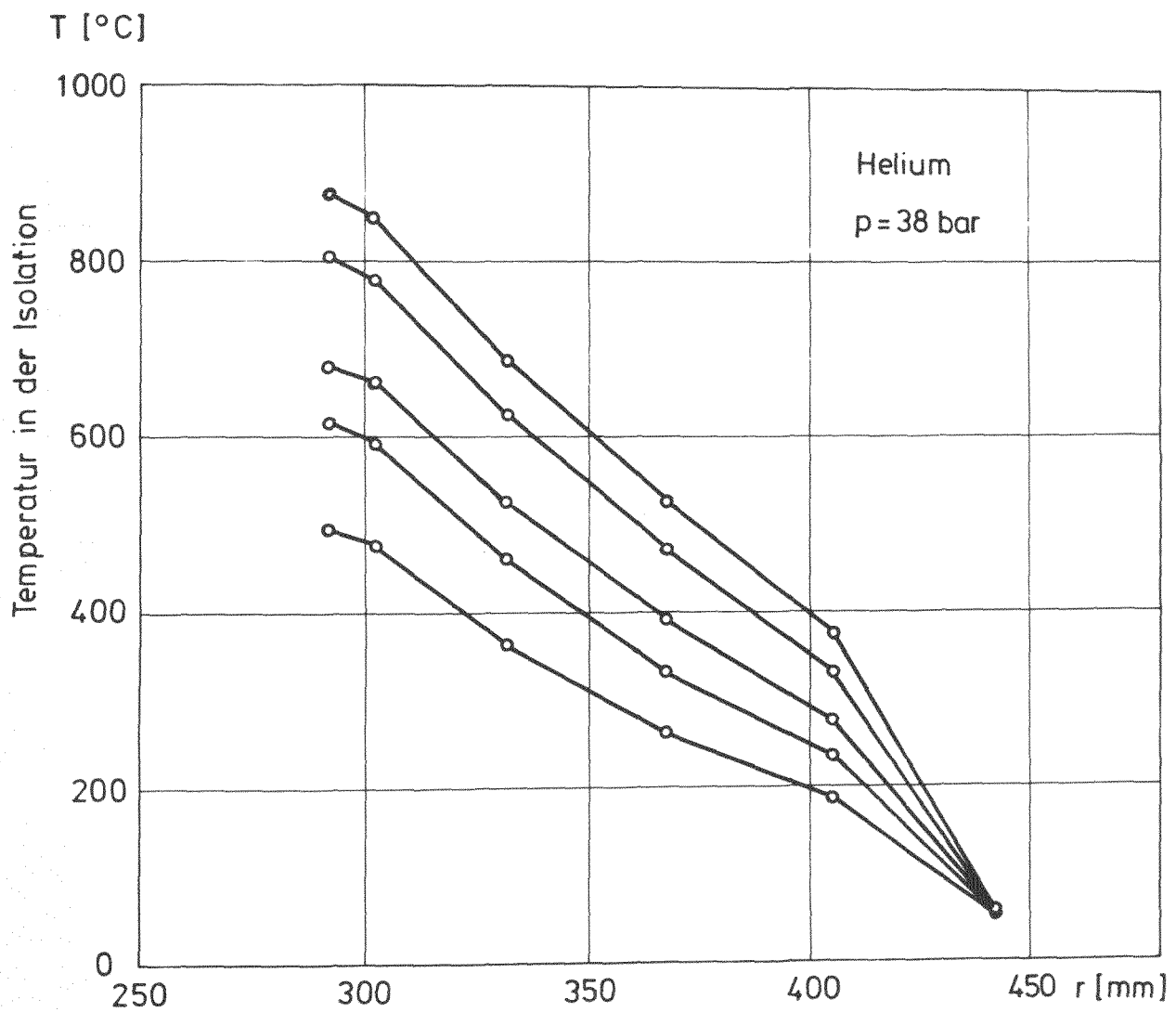


Abb. 13 Temperaturverlauf am mittleren V-Blech bei einem Druck von 38 bar und verschiedenen Linertemperaturen

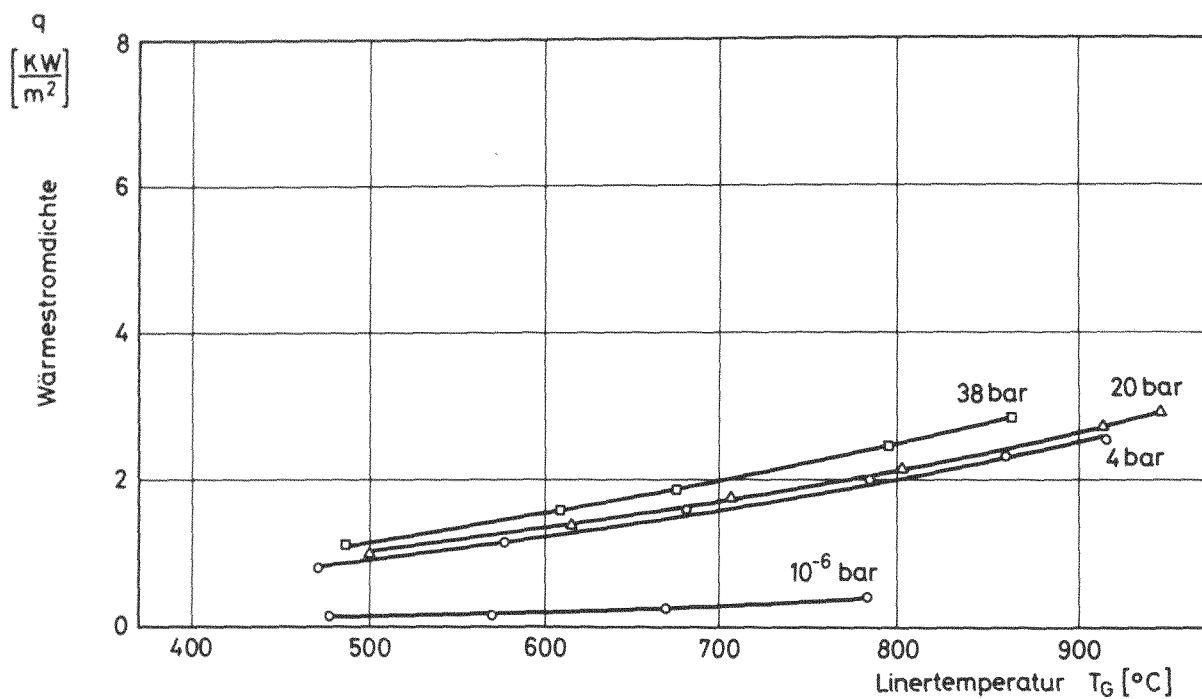


Abb. 14 Wärmestromdichte für die Isolation mit reiner Kaowoolstopfung (Meßabschnitt 4) bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Temperatur

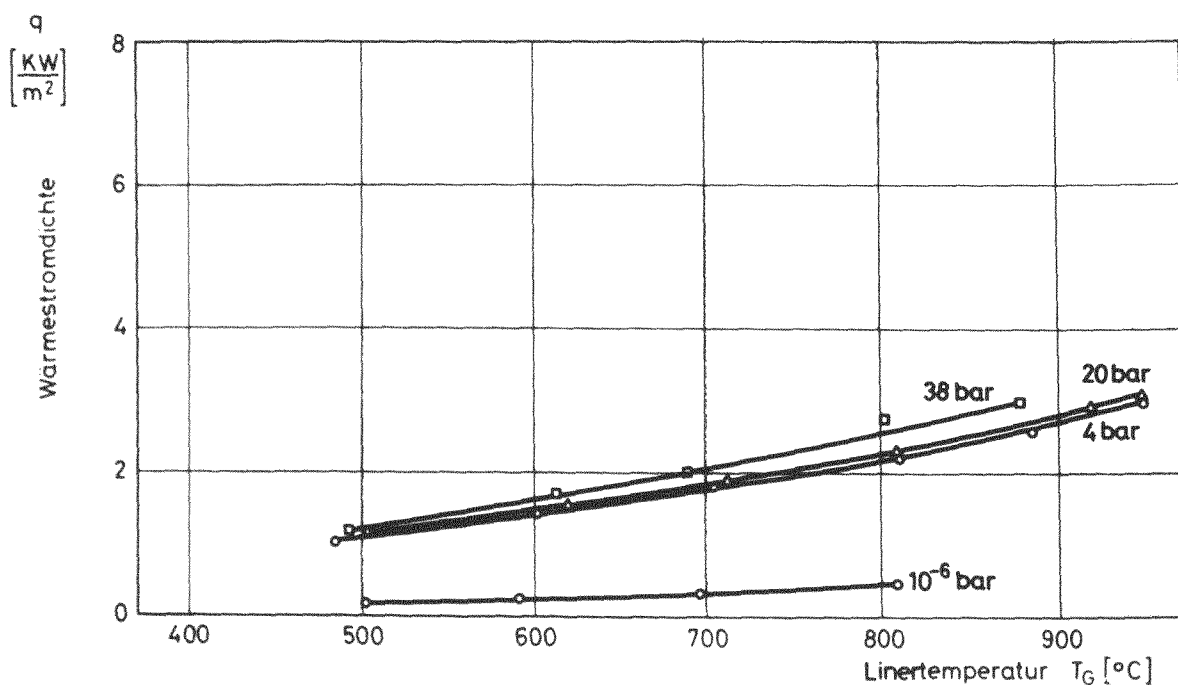


Abb. 15 Wärmestromdichte für die Isolation mit Refrasilstopfung auf der Heißgasseite (Meßabschnitt 2) bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Temperatur

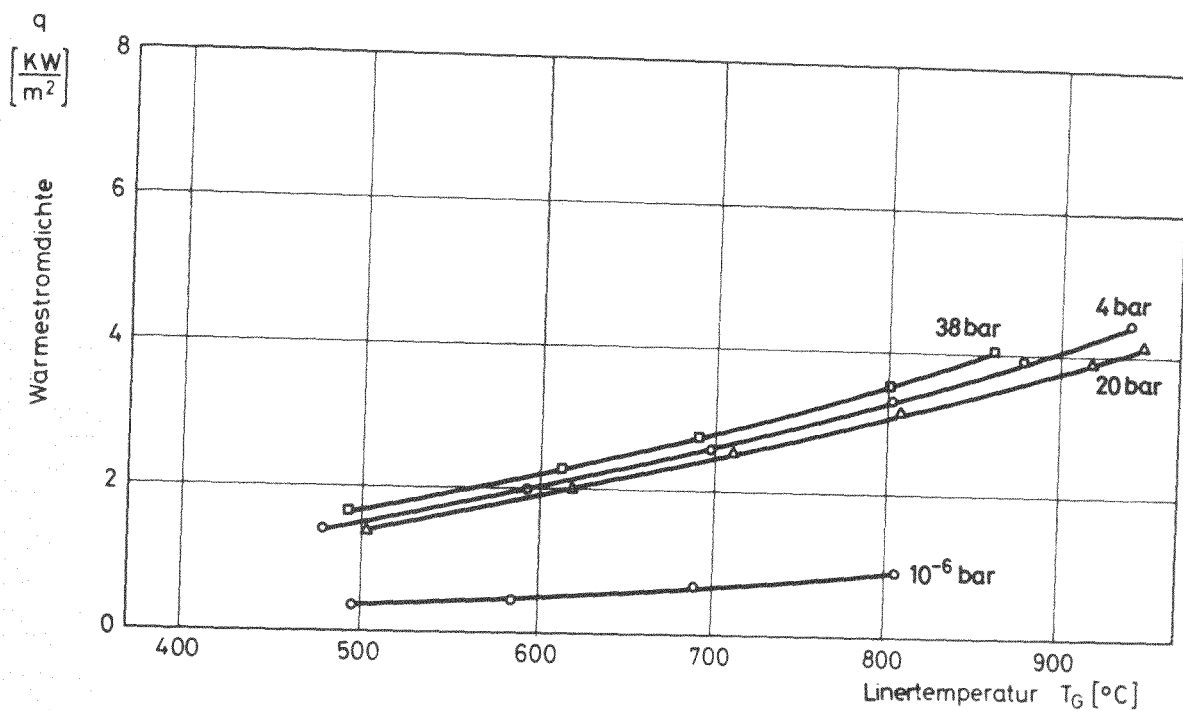


Abb. 16 Wärmestromdichte am mittleren V-Blech (Meßabschnitt 3) bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Temperatur

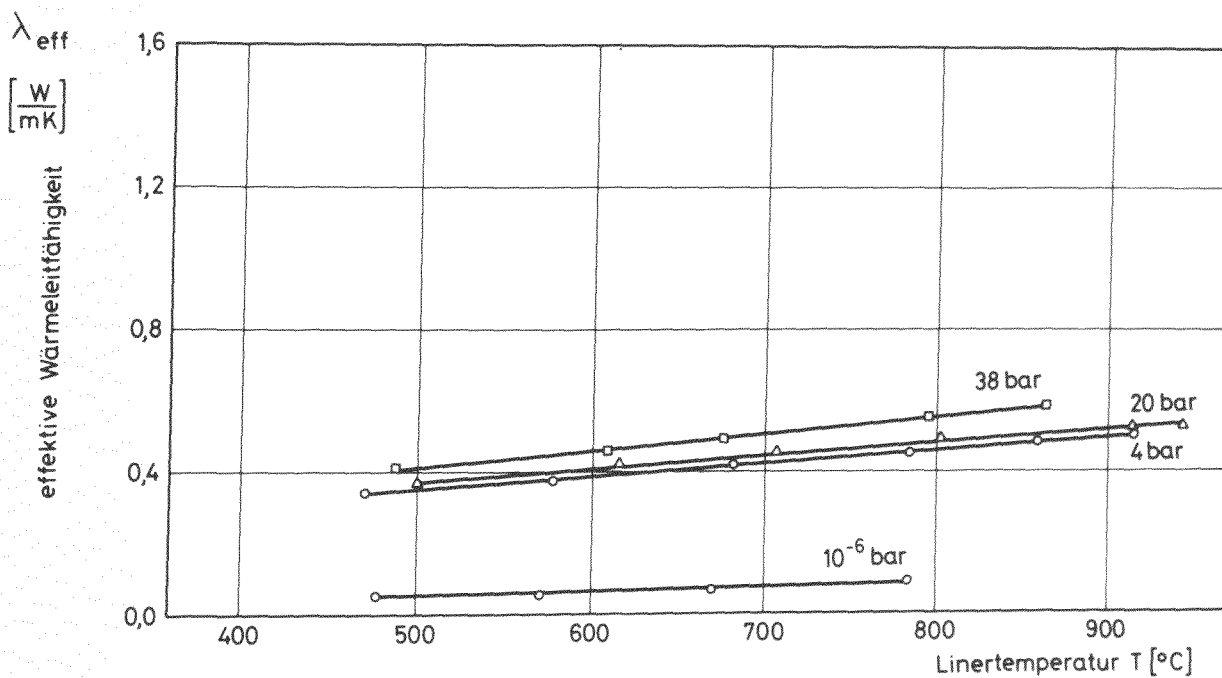


Abb. 17 Wärmeleitfähigkeit für die Isolation mit reiner Kaowoolstopfung bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Linertemperatur

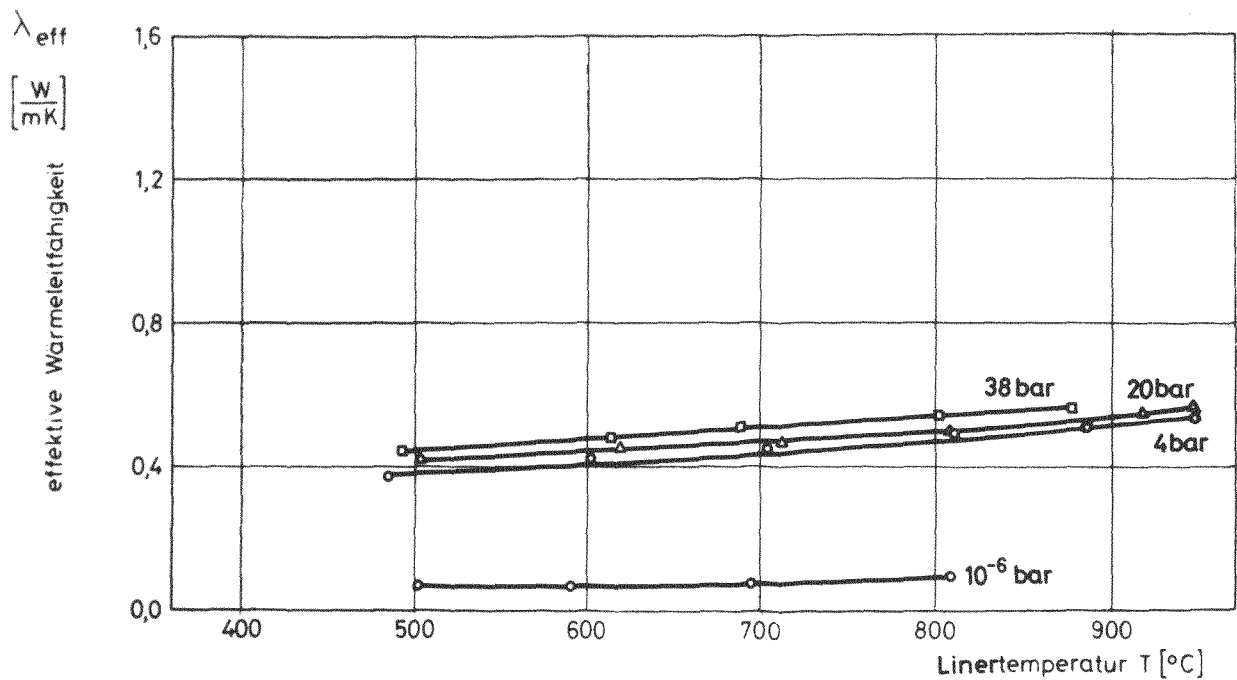


Abb. 18 Wärmeleitfähigkeit für die Isolation mit Refrasilstopfung auf der Heißgasseite bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Linertemperatur

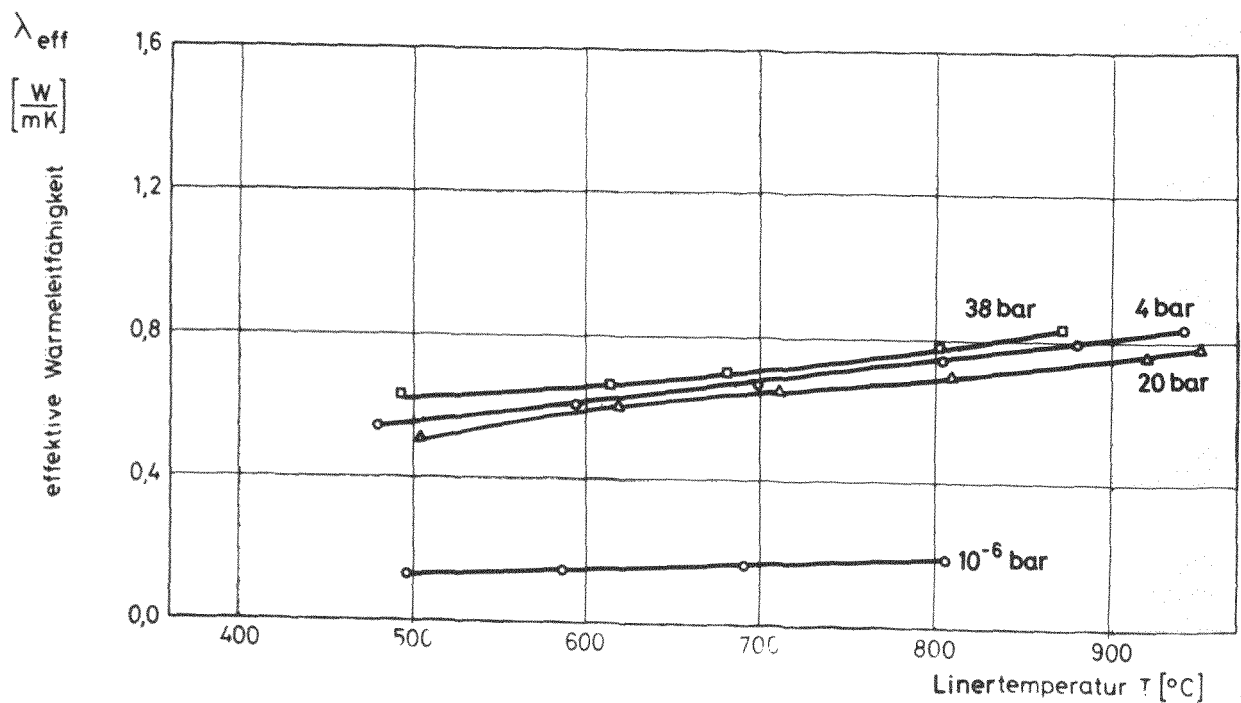


Abb. 19 Wärmeleitfähigkeit am mittleren V-Blech bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Linertemperatur

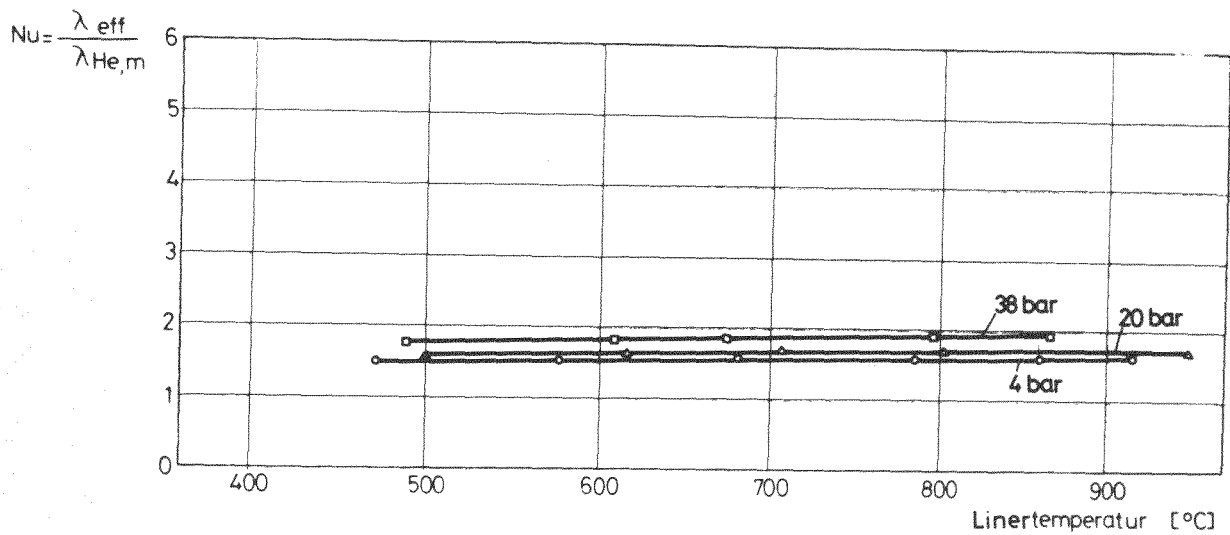


Abb. 20 Nusselt-Zahlen für die Isolation mit reiner Kaowoolstopfung bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Linertemperatur

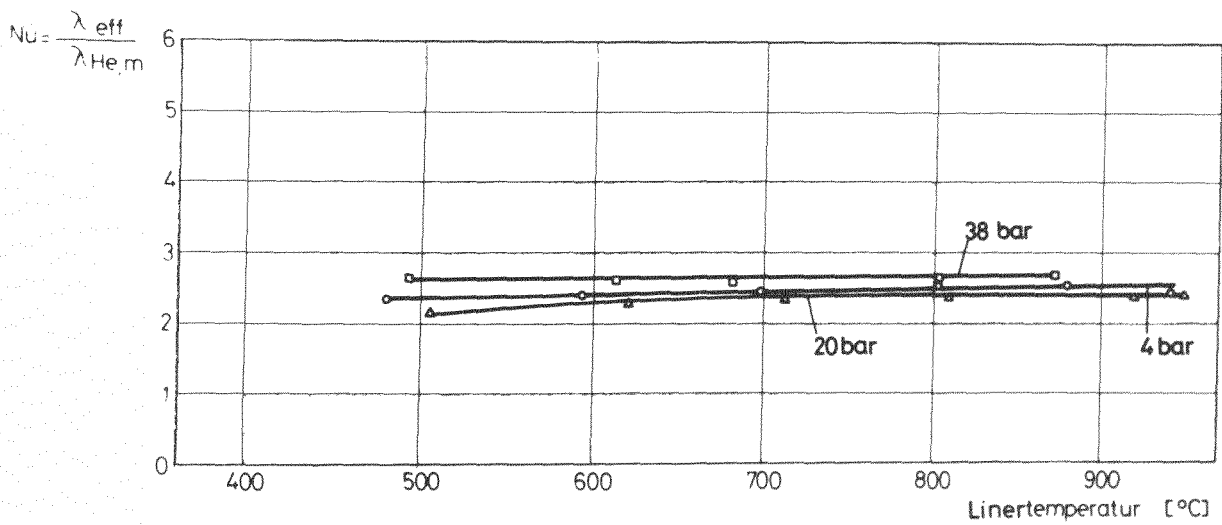


Abb. 21 Nusselt-Zahlen für die Isolation mit Refrasilstopfung auf der Heißgasseite bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Temperatur

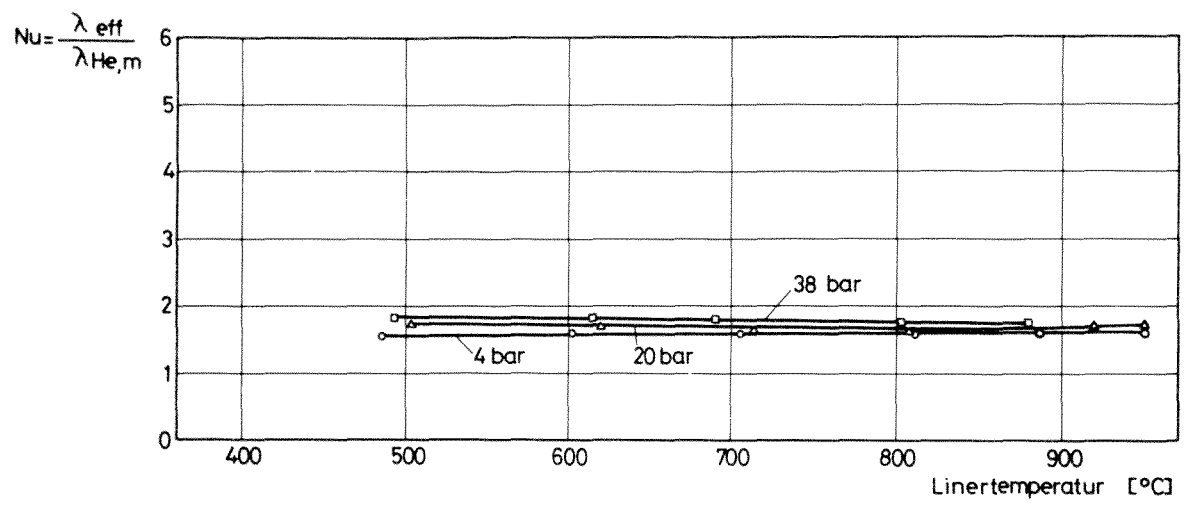


Abb. 22 Nusselt-Zahlen am mittleren V-Blech bei verschiedenen Drücken in Abhängigkeit von der Linertemperatur